Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
Кафедра "Автоматизированный электропривод"

ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Методические оказания к практическим занятиям и курсовому проекту по дисциплине "Электрические машины" для студентов специальностей 1–530105 "Автоматизированные электроприводы" и 1–430103 "Электроснабжение" дневной и заочной форм обучения

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 621.313.045(075.8)
ББК 31.26–04я73

Рекомендовано к изданию научно–методическим советом факультета автоматизированных и информационных систем РУГУ им. 1J. О. Сухого (протокол № 9 от 10.05.2006 г.)

Авторы–составители: *В. С. Захаренко, В. В. Тодарев*
Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. "Электроснабжение" ГГТУ им. П. О. Сухого *А. Г. Ус*

Обмотки электрических машин: метод, указания к практ. занятиям и курсовому проекту по дисциплине "Электрические машины" для студентов специальностей 1–530105 "Автоматизированные электроприводы" и 1–430103 "Электроснабжение" днев. и заоч. форм обучения., авт.–сост.: В. С. Захаренко. В. В. Тодарев. – Гомель. ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007, 36 с.

ISBN 978–985–420–647–9

Изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения заданий на практических занятиях и курсового проекта по дисциплине "Электрические машины". Подробно рассмотрены примеры построения всех типов обмоток электрических машин переменного и постоянного тока. Для студентов специальностей 1–530105 "Автоматизированные электроприводы" и 1–430103 "Электроснабжение" дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.313.045(075.8)
ББК 31.26–04я73
ISBN 978–985–420–647–9

Предисловие

Согласно учебному плану по дисциплине "Электрические машины" у студентов дневной формы обучения специальностей 1 –530105 "Автоматизированные электроприводы" и 1–430103 "Электроснабжение (по отраслям)" проводятся практические занятия. Студенты вышеперечисленных специальностей дневной и заочной форм обучения выполняют курсовой проект.

Цель практических занятий – закрепить теоретические знания.

На практических занятиях студенты дневной формы обучения выполняют 3 задания по построению обмоток электродвигателей:

1. Обмотка асинхронного электродвигателя, рассчитываемого в курсовом проекте.
2. Простая обмотка электродвигателя постоянного тока.
3. Сложная (многократно замкнутая) обмотка электродвигателя постоянного тока.

В ходе курсового проектирования студенты дневной и заочной форм обучения выполняют расчет и построение обмоток проектируемого электродвигателя. Студенты дневной формы обучения – асинхронного электродвигателя, студенты заочной формы обучения – асинхронного или двигателя постоянного тока.

В данном издании подробно рассмотрены основные типы обмоток электродвигателей постоянного и переменного тока. Имеется пошаговое описание построения чертежей обмоток.

1. Обмотки электродвигателей переменного тока.

Основные типы обмоток электродвигателей переменного тока:

1. Однослойные:
   1. 1. Концентрическая двухплоскостная.
   1. 2. Концентрическая трехплоскостная.
   1. 3. "Вразвалку".
   1. 4. Эвольвентная.
   1. 5. Цепная.
2. Двухслойные:
   2. 1. Петлевая.
   2. 2. Волновая.

Параметры обмоток:

1) m – число фаз (рассматриваться будут только трехфазные обмотки $m = 3$);
2) p – число пар полюсов ($2p$ – число полюсов);
3) Z – число пазов;
4) τ – полюсное деление (количество пазов на один полюс):

$$\tau = \frac{Z}{2p}$$

5) q – ширина фазной зоны. В большинстве современных двигателей ширина фазной зоны соответствует 60 эл. градусам. В этом случае:

$$q = \frac{\tau}{3}$$

6) y – шаг обмотки (шаг витка и катушки). Для однослойных обмоток шаг считается полным, т. е. равным полюсному делению ($y = \tau$). Для двухслойных обмоток шаг может быть как полным ($y = \tau$), так и укороченным ($y < \tau$).
7) a – число параллельных ветвей.

Ширина фазной зоны равна количеству катушек в катушечной группе. Катушка – группа последовательно соединенных витков, уложенных в одни и те же пазы и имеющих общую пазовую изоляцию. Для однослойных обмоток в одном пазу уложена одна сторона одной катушки (т. е. один "проводник"). В двухслойных обмотках каждый паз делится изоляцией по вертикали на 2 слоя, в которые укладываются *2* проводника двух различных катушек (проводник одной катушки – в верхний слой, проводник другой катушки – в нижний). Катушечная группа – группа соединенных последовательно катушек принадлежащих одной фазе. Катушечные группы соединяются последовательно в обмотку фазы, если a = 1. Если a > 1, то группы последовательно соединяются в ветви, число которых равно a. Ветви, в свою очередь, соединяются параллельно для получения обмотки фазы.

Порядок построения обмоток переменного тока:

1. Изображаются оси пазов.
2. В соответствии со значениями τ, q, y расставляются фазные зоны и границы полюсов. Фазные зоны расставляются в порядке: Y, A, Z, B, X, C.
3. В соответствии с расположением фазных зон изображаются проводники и катушки. Катушки соединяются в катушечные группы.
4. Выполняются соединения катушечных групп в обмотку фазы и выводятся зажимы обмотки.

1. 1. Однослойные обмотки.

1. 1. 1. Однослойная концентрическая двухплоскостная обмотка.

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:
1. Число пар полюсов p = 3, число полюсов $2p$ = 6.
2. Число пазов Z = 36.
3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{6} = 6$$

4. Ширина фазной зоны:

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{6}{3} = 2$$

5. Число параллельных ветвей a = 1.

Фазные зоны расставляются в указанном выше порядке. Число пазов в каждой фазной зоне q. Также расставляем границы полюсов. В северный полюс входят фазные зоны Y, A, Z, в южный – B, X, C. Поскольку обмотка – однослойная и шаг соответственно полный, то границы полюсов совпадают с границами фазных зон (перед Y и перед B). Полюс, в котором находится фазная зона A – северный, а в котором X – южный.
Проводники для данного типа обмотки соединяются в катушки так, чтобы катушки одной группы были вложены друг в друга, т. е. концентрическими. Катушечные группы на чертеже изображаются двух разных размеров. В реальной обмотке все катушечные группы геометрически одинаковы, а лобовые части обмотки отогнуты на 2 разных угла, т. е. лежат в двух плоскостях (двухплоскостная). Начнем с фазы A. Соединим проводники фазной зоны A с проводниками фазной зоны X. Пусть первая катушечная группа будет "маленькая". Теперь "внутри" этой катушечной группы проводники фазных зон Z и B должны образовывать "большие" катушечные группы. Далее, двигаясь вправо, выполняем соединения чередуя величину катушечных групп.

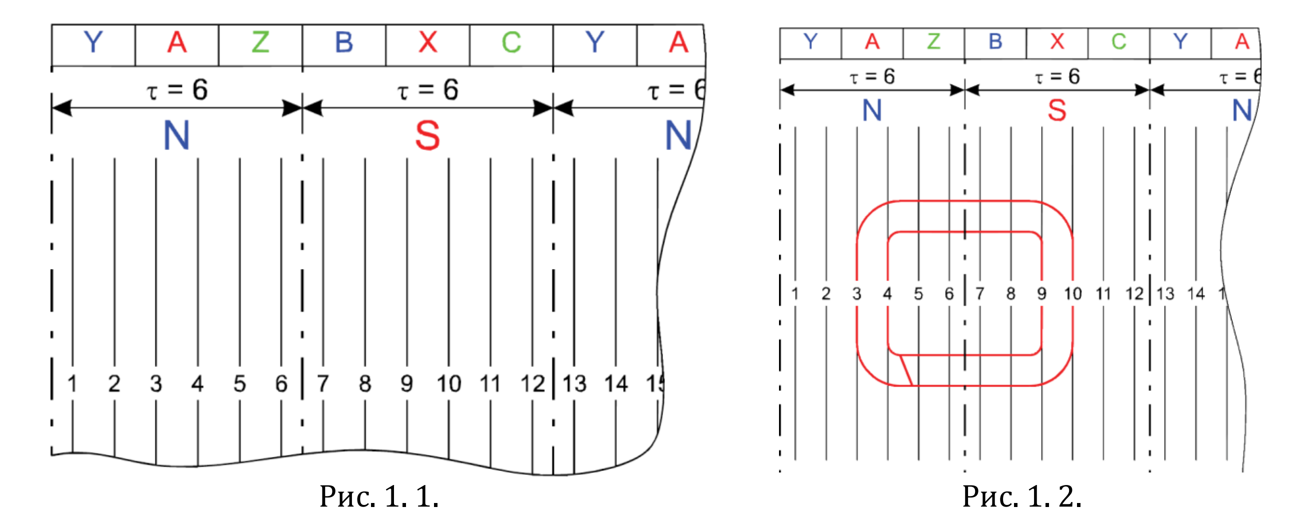


Рис. 1. 1.

Рис. 1. 2.

Для двухплоскостных обмоток с нечетным числом пар полюсов одна катушечная группа будет "косая". В рассматриваемом примере в последней группе проводники фазной зоны C должны быть "маленькими", в зоне Z – "большими".

Рис. 1. 3.

Рис. 1. 4.

Рис. 1. 5.

Рис. 1. 6.

Если схематично изобразить катушечные группы фазы A и расставить направление *эдс* (в северном полюсе – вверх, в южном – вниз), то видно, что для следования по направлению *эдс* необходимо соединить катушечные группы последовательно, как показано на рис 1. 6.

Поскольку катушки в группе соединены последовательно, то первый проводник группы – проводник левой стороны внешней катушки, последний проводник группы – правый проводник внутренней катушки.

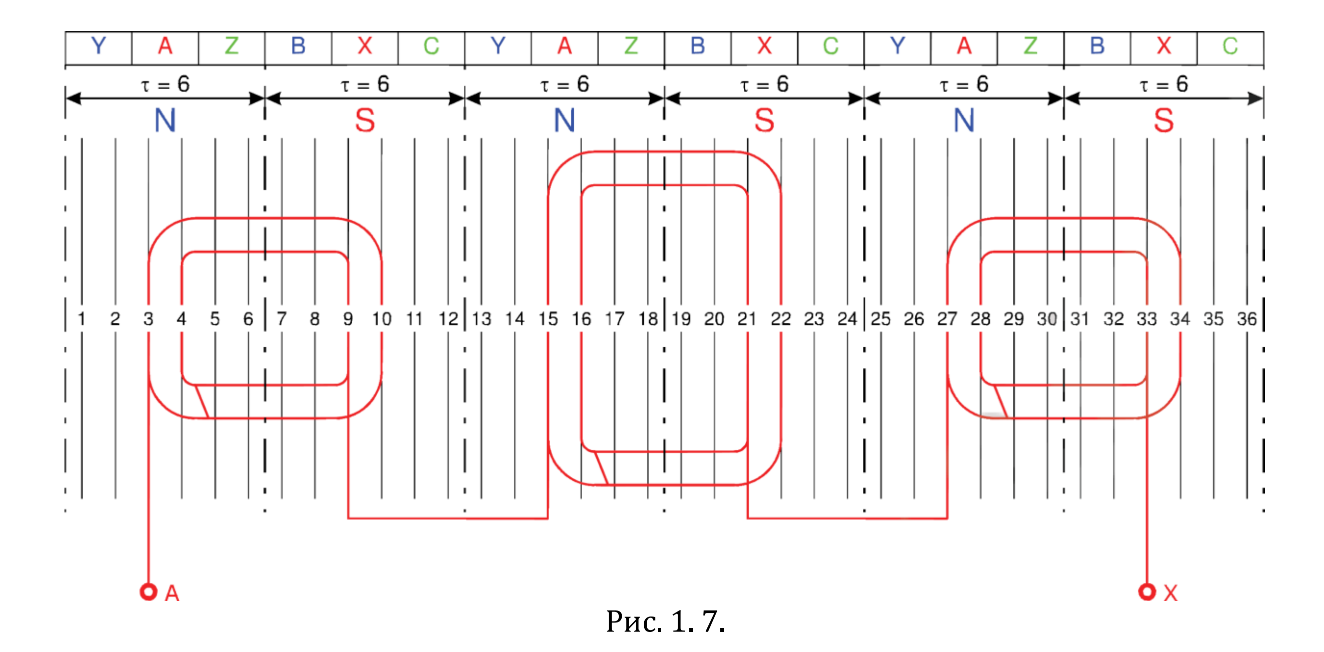


Рис. 1. 7.

Для остальных фаз соединения выполняются аналогично. Начало фазы B расположено правее начала A на две фазные зоны. Начало C – на две фазные зоны правее B. Полностью построенная обмотка изображена на рис. 1. 8.

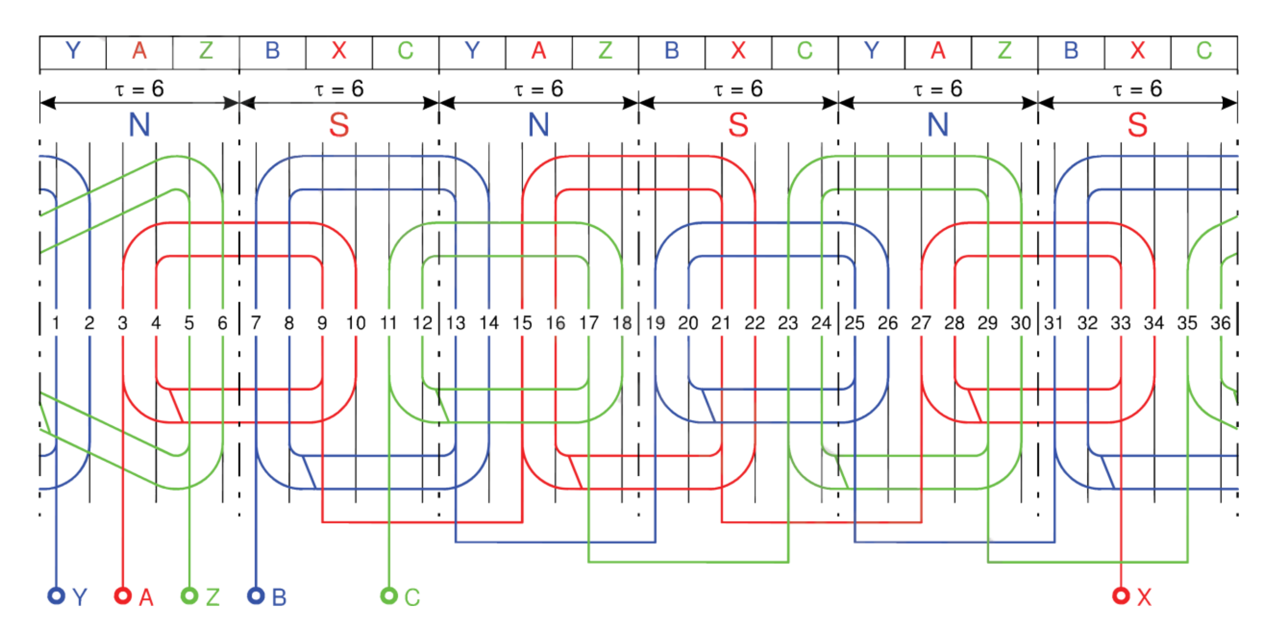


Рис. 1. 8. Однослойная концентрическая двухплоскостная обмотка.

1. 1. 2. Однослойная концентрическая трехплоскостная обмотка.

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:
1. Число пар полюсов $p = 1$, число полюсов $2p = 2$.
2. Число пазов $Z = 24$.
3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{2} = 12$$

4. Ширина фазной зоны:

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{12}{3} = 4$$

5. Число параллельных ветвей $a = 1$.

Фазные зоны и границы полюсов располагаются так же, как и для двухплоскостной обмотки.

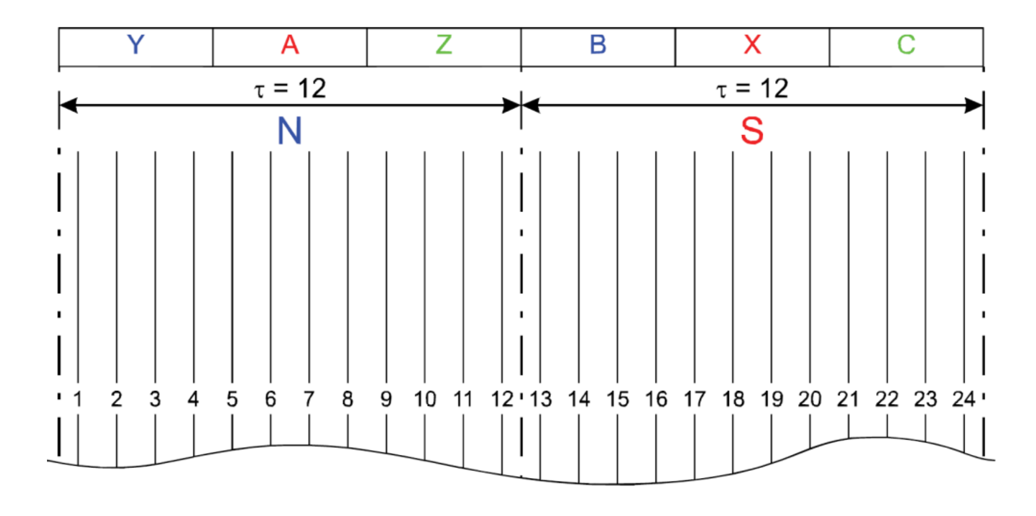


Рис. 1. 9.

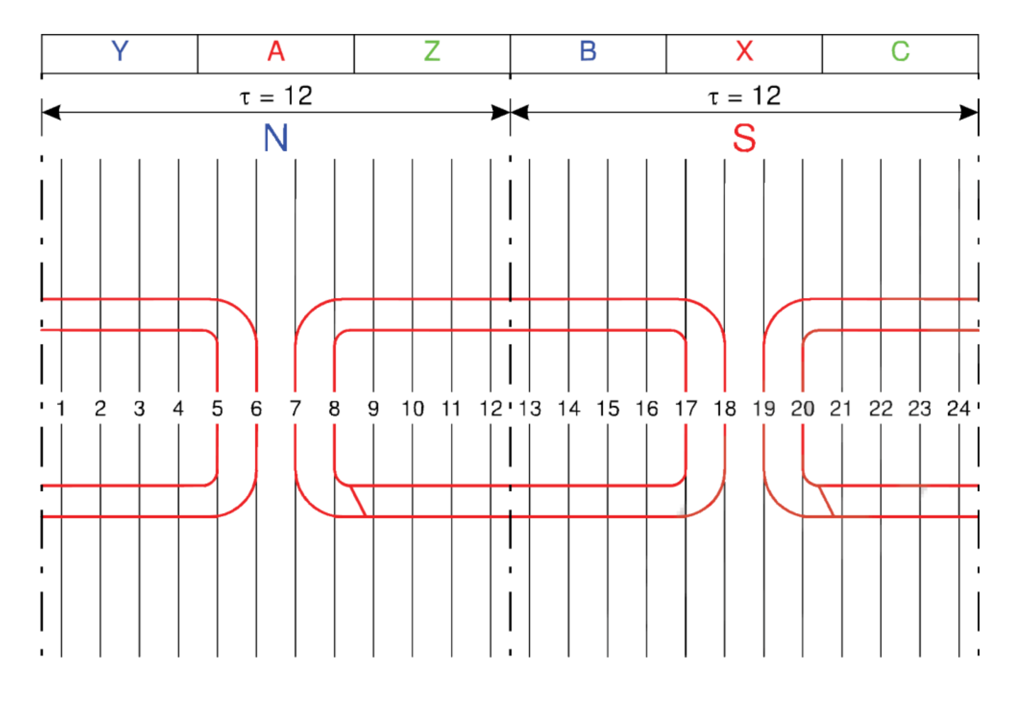


Рис. 1. 10.

Соединяются проводники в катушки так же, чтобы катушки лежали одна внутри другой. Катушечные группы выполняются трех размеров по вертикали. Самые маленькие – фаза *A*. Средние – *B*. Большие – *C*. Отличие от двухплоскостной обмотки в соединениях проводников заключается в том, что фазная зона делится пополам. Половина проводников соединяется в катушки в левую сторону, вторая половина – в правую сторону.

Соединения катушечных групп в обмотку фазы отличается от двухплоскостной обмотки. Изобразим схематично группы, расставим фазные зоны и направления *эдс*. Чтобы следовать в направлении *эдс,* необходимо нечетные катушки обходить по часовой стрелке, четные – против часовой стрелки. Таким образом, последний проводник первой группы соединяем с последним проводником второй группы. Затем первый проводник второй группы соединяем с первым проводником третьей и т. д. Для рассматриваемого примера катушечных групп только две, соответственно на первом проводнике второй группы заканчивается обмотка фазы. Начало фазы *A* расположено в фазной зоне *A* на первом проводнике левой стороны катушечной группы. Соединения катушечных групп для остальных фаз аналогично. Начало фазы *B* расположено правее начала фазы *A* на 2 фазные зоны. Начало фазы *C* – на 2 фазные зоны правее *B*. Полностью построенная обмотка изображена на рис. 1. 14.

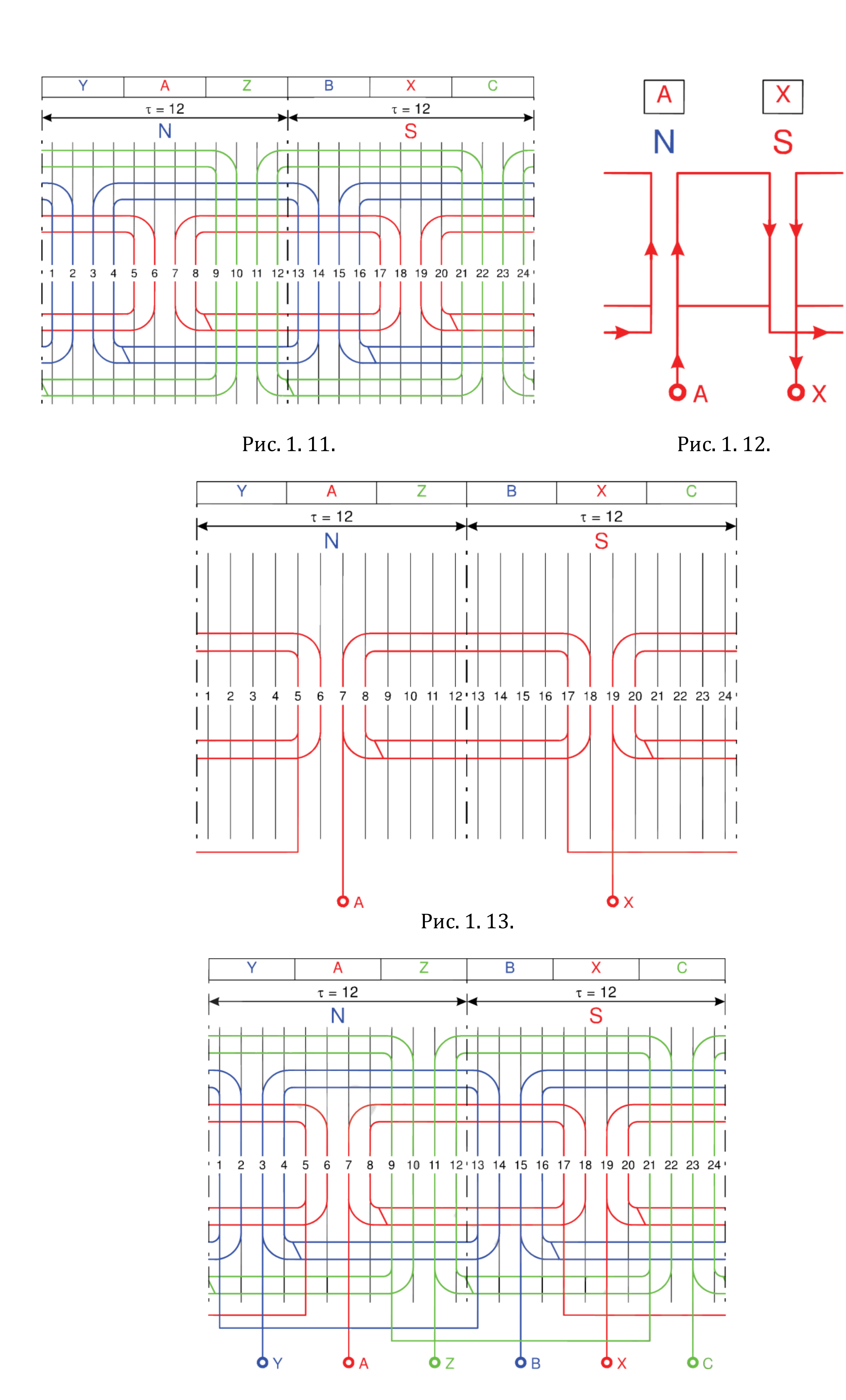


Рис. 1. 11.

Рис. 1. 12.

Рис. 1. 13.

Рис. 1. 14. Однослойная концентрическая трехплоскостная обмотка.

1. 1. 3. Однослойная "в развалку".

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:
1. Число пар полюсов p = 1, число полюсов $2p$ = 2.
2. Число пазов Z = 24.
3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{2} = 12$$

4. Ширина фазной зоны:

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{12}{3} = 4$$

5. Число параллельных ветвей a = 2.

Расположение фазных зон и полюсов такое же, как и для рассмотренных концентрических обмоток.
Так же как и для трехплоскостной обмотки, фазная зона делится пополам. Половина проводников соединяется влево, половина – вправо. Катушки лежат одна внутри другой. Но катушечные группы все одинаковые и изображаются как "косая" группа двухплоскостной обмотки. Полностью построенная обмотка показала на рис. 1. 20.

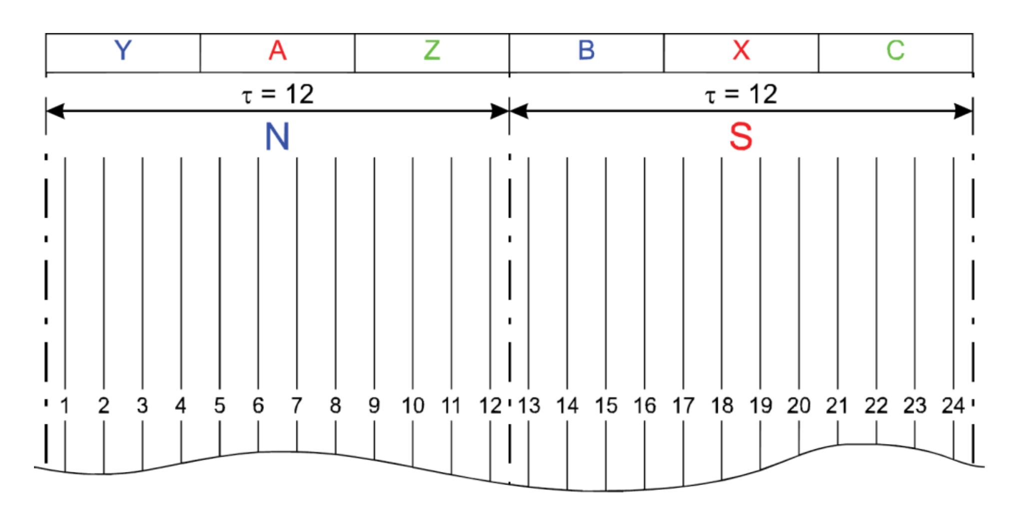


Рис. 1. 15.

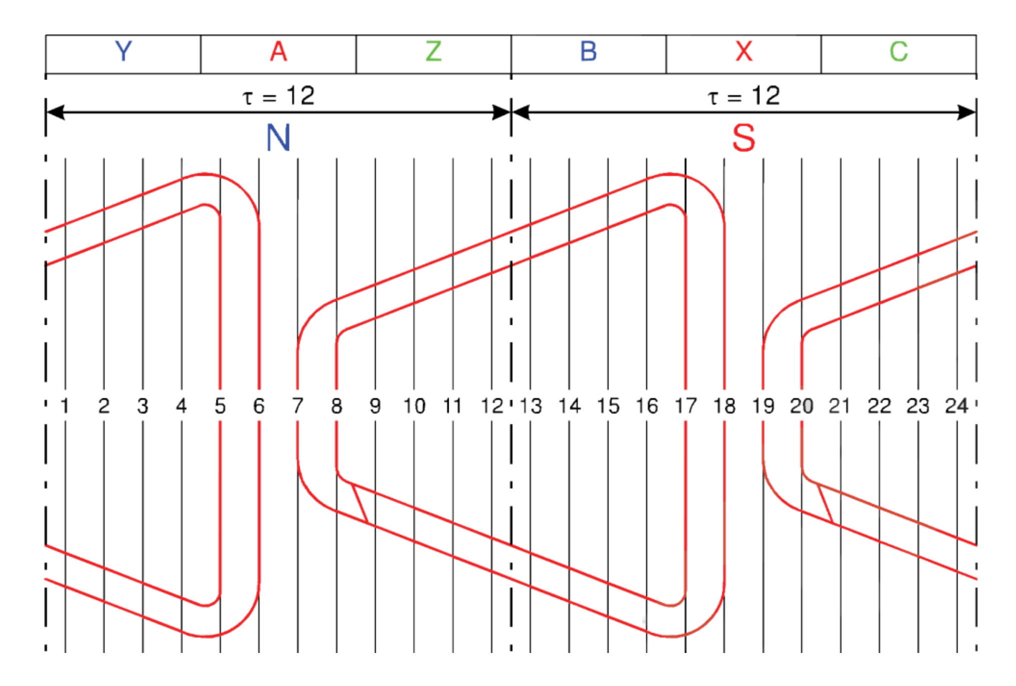


Рис. 1. 16.

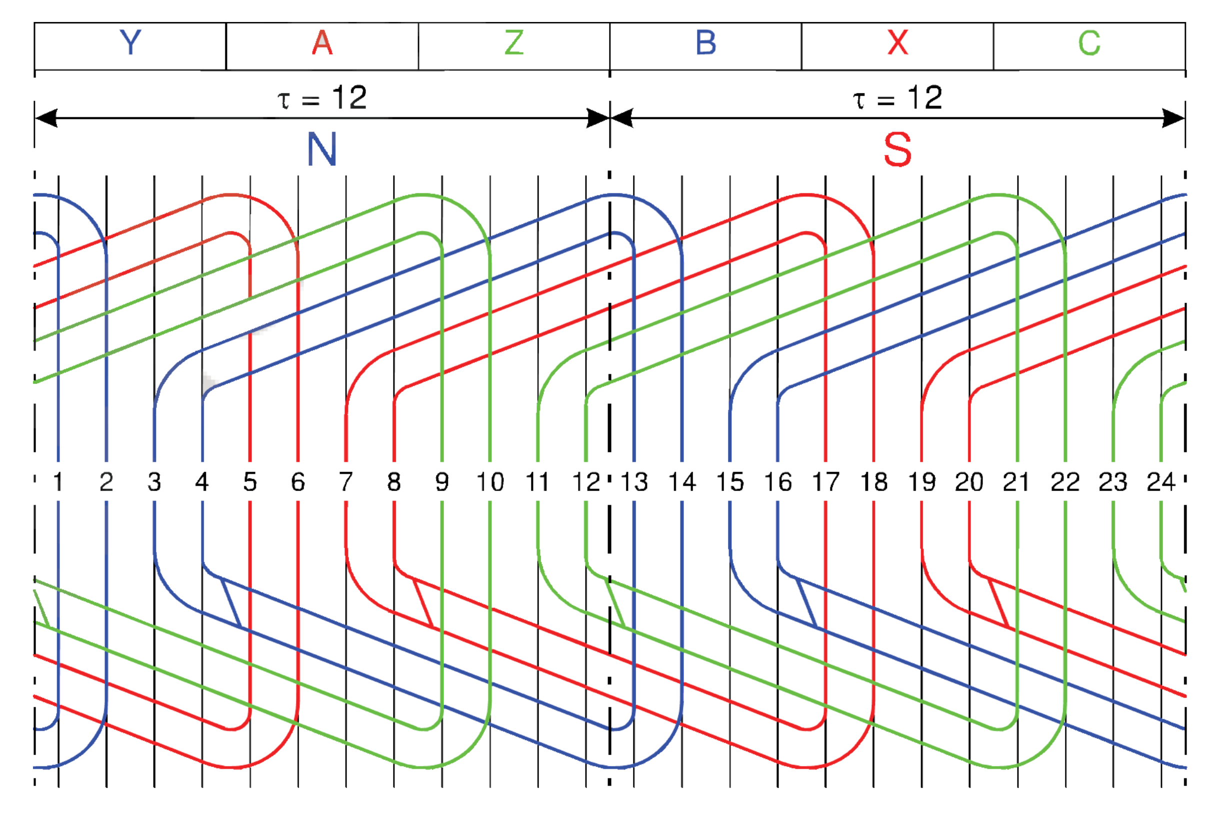


Рис. 1. 17.

Порядок соединения катушечных групп в обмотку фазы такой же, как и для трехплоскостной обмотки. В данном примере число параллельных ветвей a = 2 и по 2 катушечные группы для каждой фазы. Поэтому в каждой ветви будет по одной катушечной группе. То есть их необходимо соединить параллельно. При этом учтем, что обходить нечетные группы надо по часовой стрелке, а четные – против часовой стрелки.

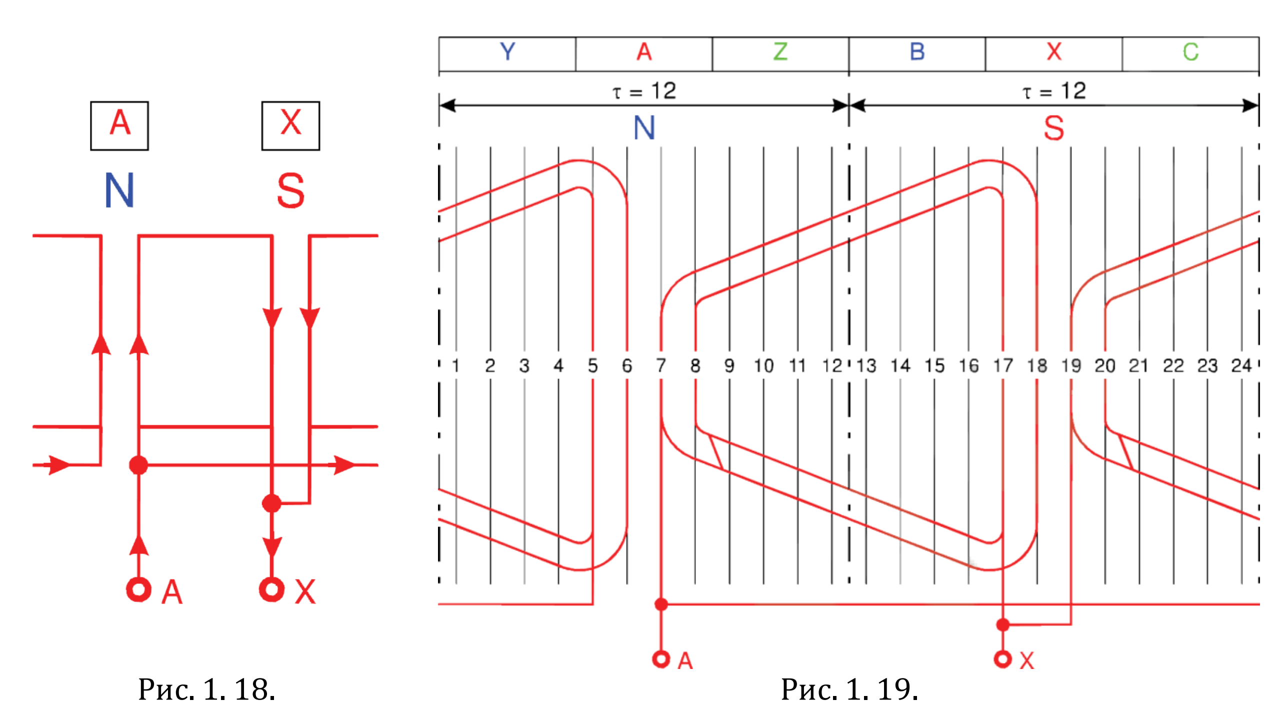


Рис. 1. 18.

Рис. 1. 19.

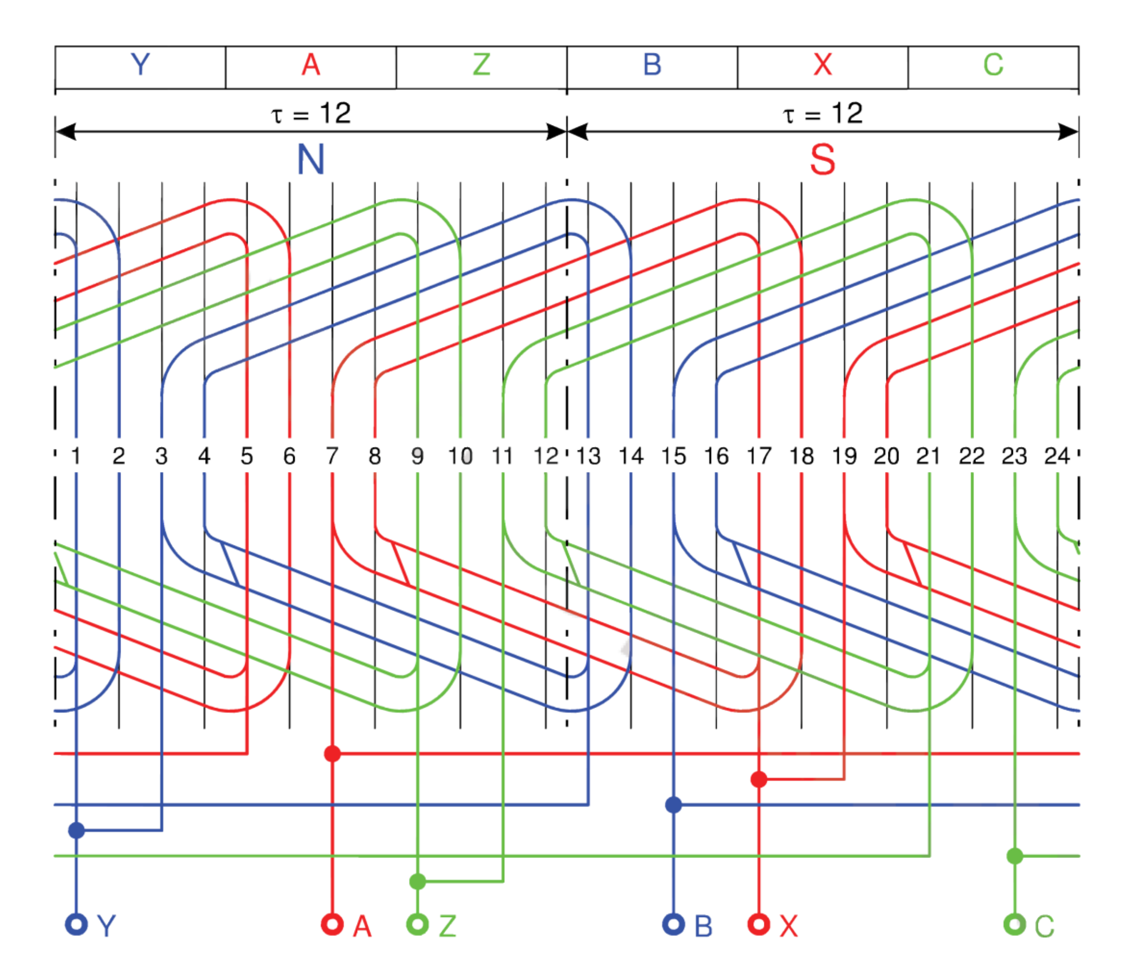


Рис. 1. 20. Однослойная "в развалку" обмотка.

1. 2. Двухслойные обмотки.

1. 2. 1. Двухслойная петлевая обмотка с полным шагом.

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:
1. Число пар полюсов $p = 2$, число полюсов $2p = 4$.
2. Число пазов $Z = 24$.
3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

4. Ширина фазной зоны:

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{6}{3} = 2$$

5. Шаг обмотки (полный) $y = \tau = 6$
6. Число параллельных ветвей $a = 1$.

В двухслойных обмотках изображаются фазные зоны для обоих слоев. Поскольку для рассматриваемого примера шаг обмотки – полный, то фазные зоны для обоих слоев расположены согласованно, и границы полюсов расставляются, как и для однослойных обмоток. В каждом пазу по 2 проводника: верхнего и нижнего слоя. Проводник верхнего слоя изображается сплошной линией немного левее оси паза, нижнего слоя – штриховой линией немного правее оси паза.

Соединяем проводники в катушки. Вначале соединяем первый проводник фазной зоны A верхнего слоя с первым проводником фазной зоны X нижнего слоя следующего полюса. Затем вторые проводники фазных зон и т. д. Катушки соединяются последовательно в катушечные группы. Затем проводники фазной зоны X верхнего слоя с проводниками фазной зоны A нижнего слоя следующего полюса и т. д. Для остальных фаз соединения выполняются аналогично.

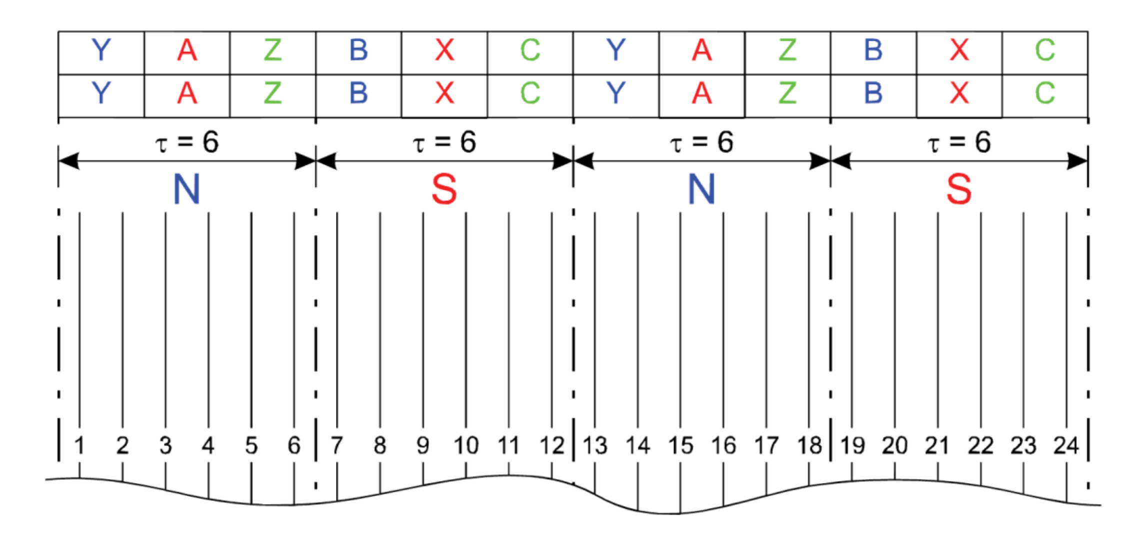


Рис. 1. 21.

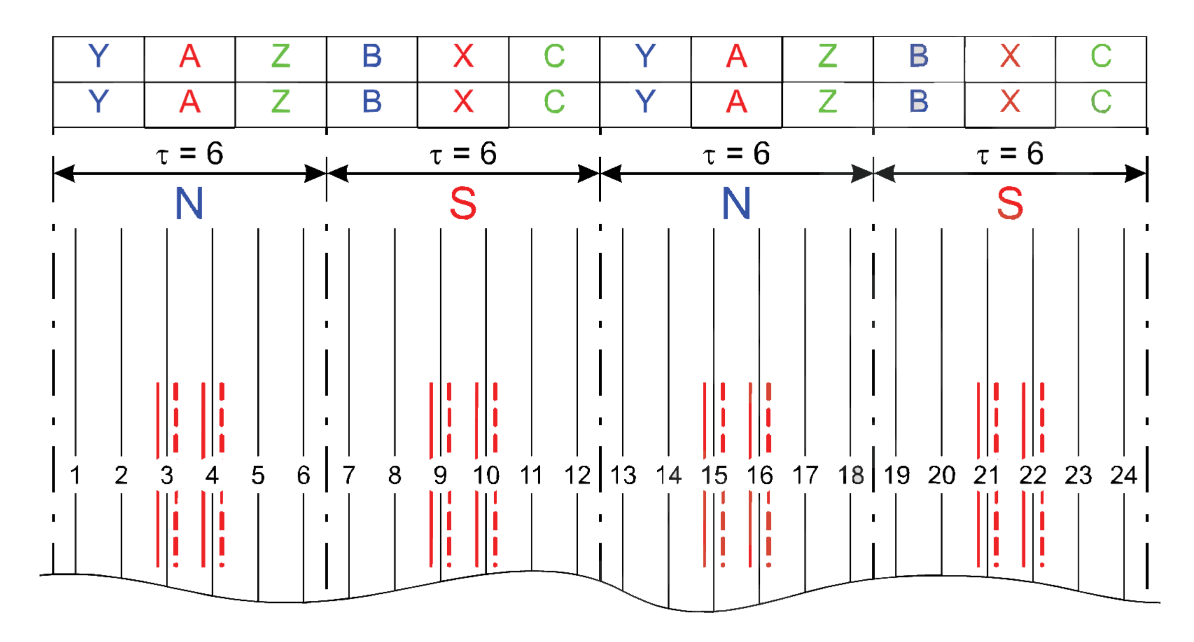


Рис. 1. 22.

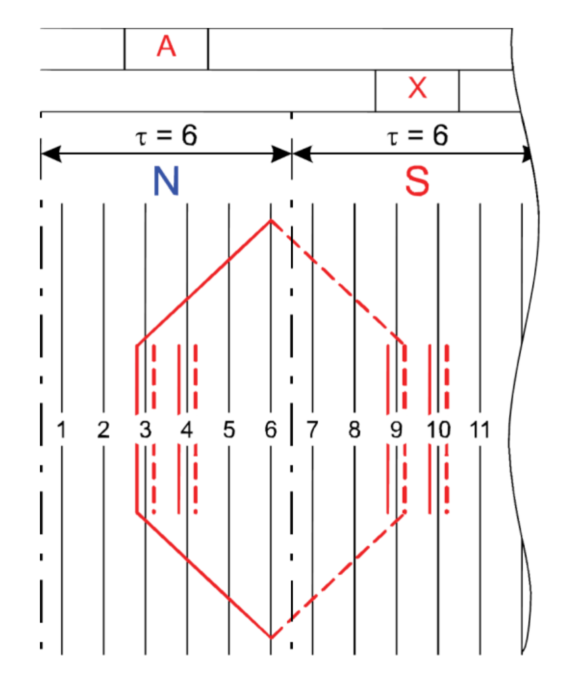


Рис. 1. 23.

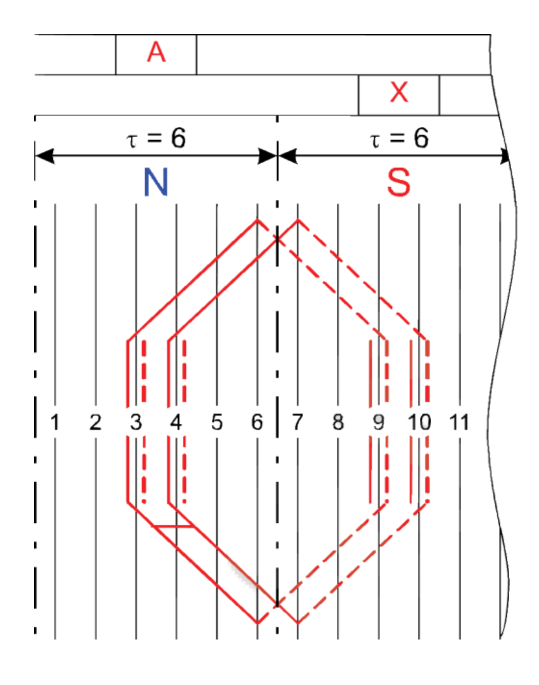


Рис. 1. 24.

Рис. 1. 25.

Рис. 1. 26.

Рис. 1. 27.

Изобразив схематично катушечные группы и расставив положительные направления *эдс*, увидим, что так же, как и для однослойной концентрической трехплоскостной обмотки, положительное направление обхода нечетных катушек – по часовой стрелке, четных – против часовой стрелки. Таким образом, соединения групп в обмотку фазы выполняются аналогично.

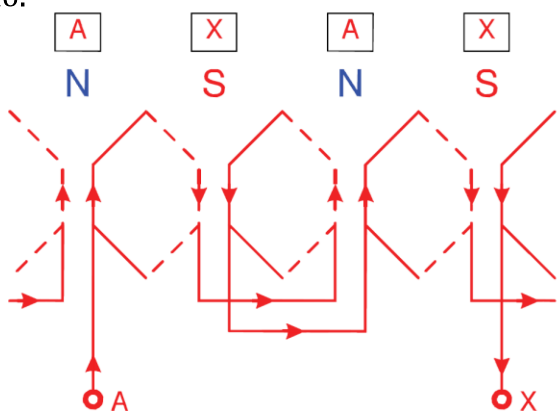


Рис. 1. 28.

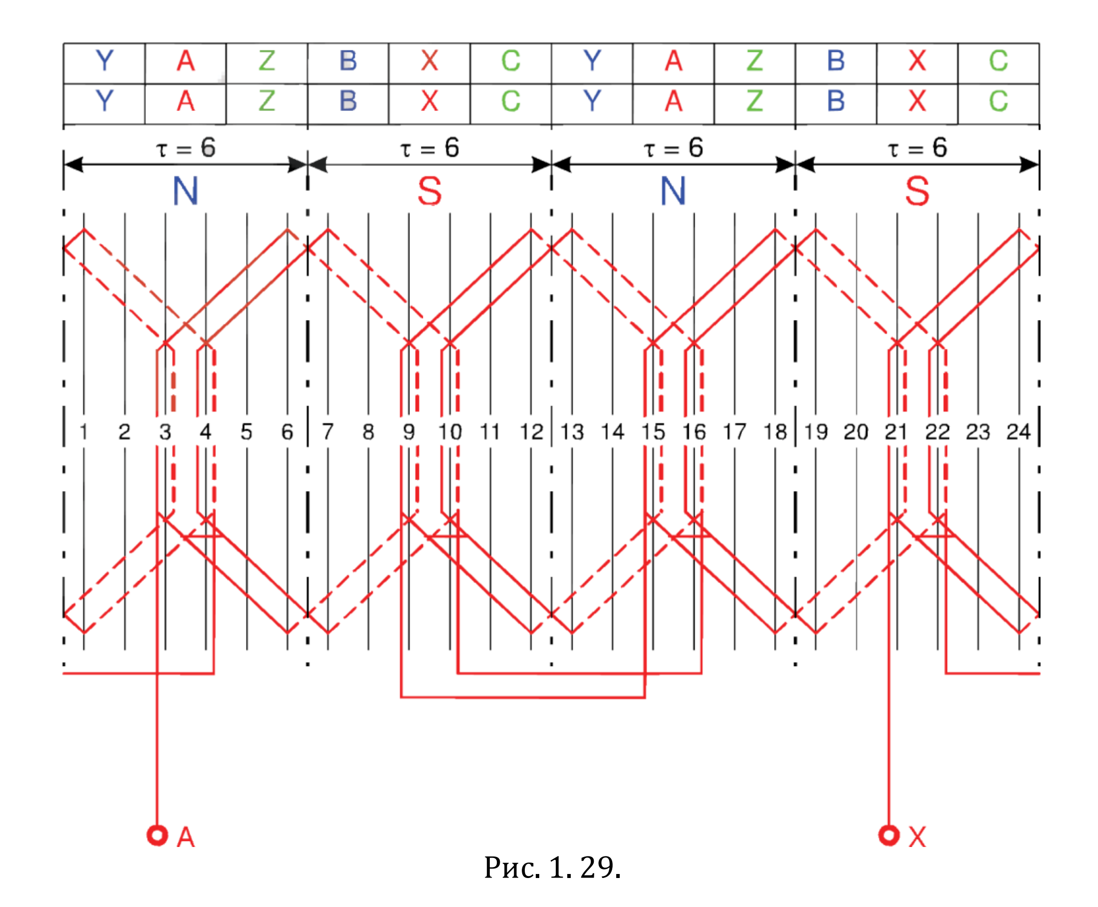


Рис. 1. 29.

Соединения для остальных фаз аналогичны. Начала фаз сдвинуты каждая относительно предыдущей на 2 фазные зоны. Полностью построенная обмотка показана на рис. 1. 31.

1. 2. 2. Двухслойная петлевая обмотка с укороченным шагом.

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:
1. Число пар полюсов p = 2, число полюсов $2p$ = 4.
2. Число пазов Z = 24.
3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

4. Ширина фазной зоны:

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{6}{3} = 2$$

5. Шаг обмотки укороченный $y = 5 < \tau$
6. Число параллельных ветвей a = 2.

При укорочении шага фазные зоны верхнего и нижнего слоев сдвинуты относительно друг друга на величину $\tau - y$. Для того чтобы сохранить границу полюса перед первым пазом (при четной разнице $\tau - y$) или чтобы она прошла ровно по первому пазу (при нечетной разнице $\tau - y$), необходимо сдвинуть относительно согласованного положения:
– верхний слой на $(\tau - y)/2$ пазов при четной разности $\tau - y$ и на $(\tau - y + 1)/2$ пазов при нечетной разности $\tau - y$.
– нижний слой на $(\tau - y)/2$ пазов при четной разности $\tau - y$ и на $(\tau - y - 1)/2$ пазов при нечетной разности $\tau - y$.
Таким образом, для рассматриваемого примера верхний слой сдвигается вправо на

$$\frac{\tau - y + 1}{2} = \frac{6 - 5 + 1}{2} = 1 \text{ паз(ов)}$$

А нижний влево на

$$\frac{\tau - y - 1}{2} = \frac{6 - 5 - 1}{2} = 0 \text{ пазов}$$

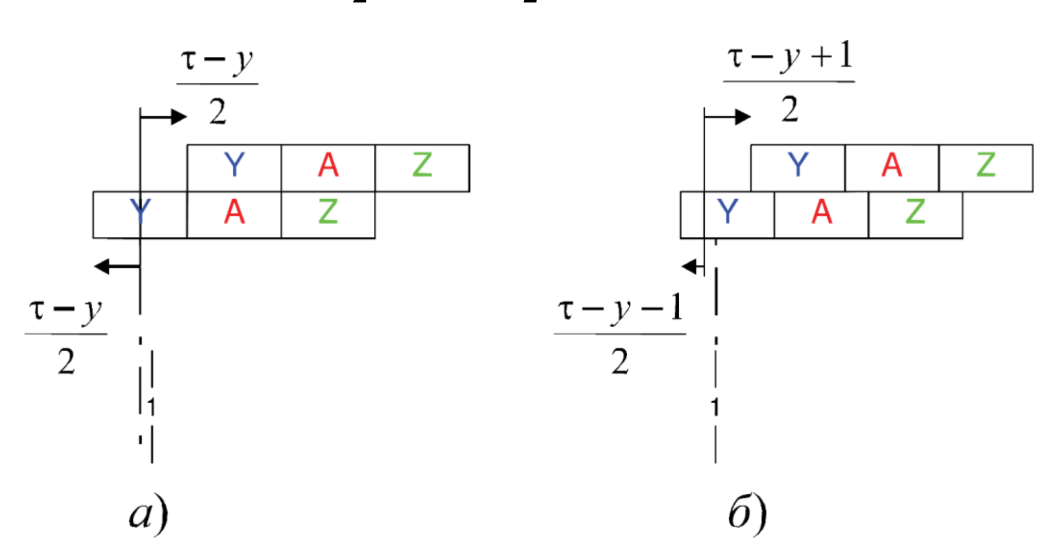


Рис. 1. 30. Положение фазных зон при укорочении шага:
а – при четной разности $\tau - y$; *б* – при нечетной разности $\tau - y$

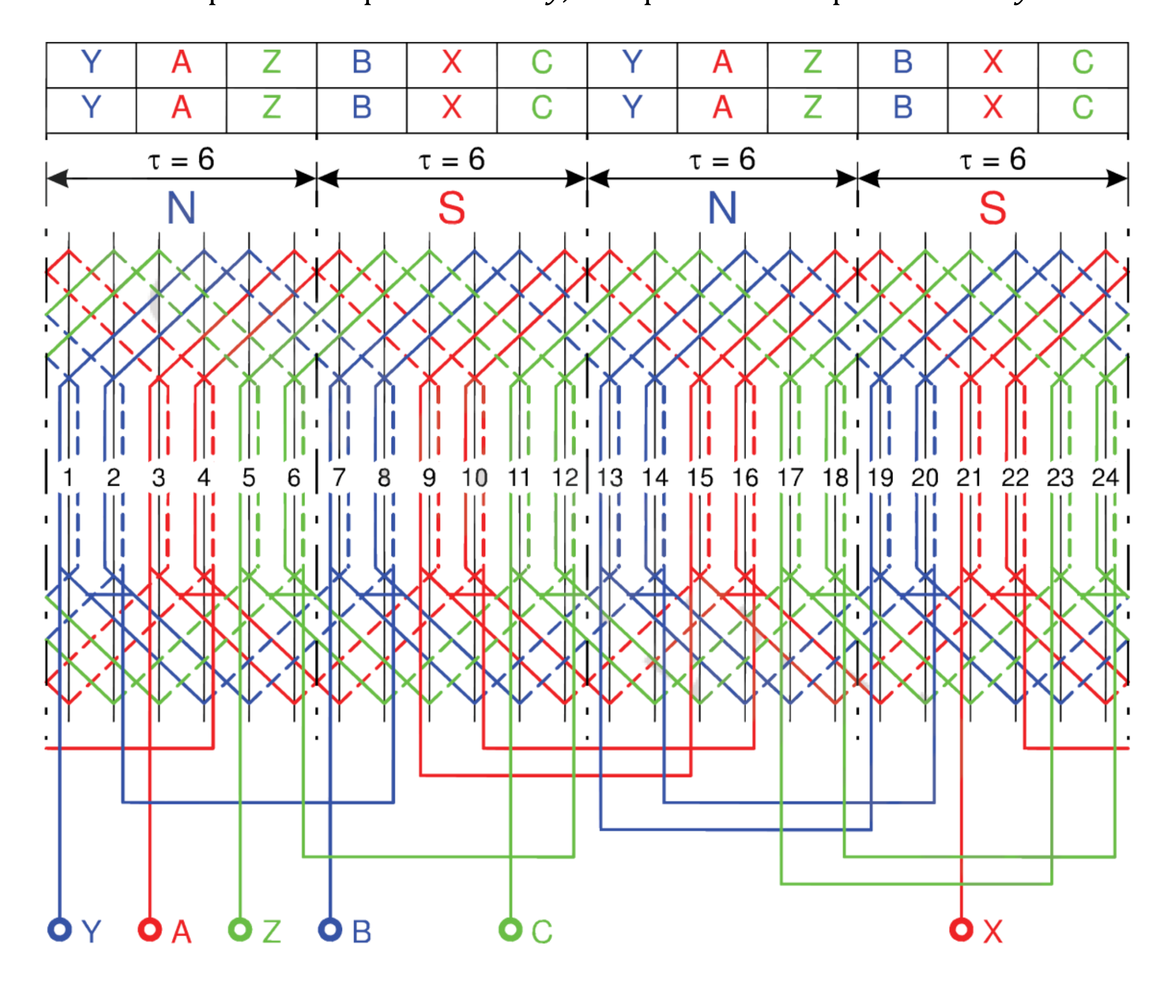


Рис. 1. 31. Двухслойная петлевая обмотка с полным шагом.

Границы полюсов для обмоток с укороченным шагом расставляются в соответствии с расположением фазных зон обоих слоев. Центр северного полюса расположен по центру фазных зон *А* обоих слоев. Отсчитываем в обе стороны от центра $\tau/2 = 6/2 = 3$ паза. При этом получаем, как и ожидалось при расположении фазных зон, границу первого полюса, проходящую по первому пазу.

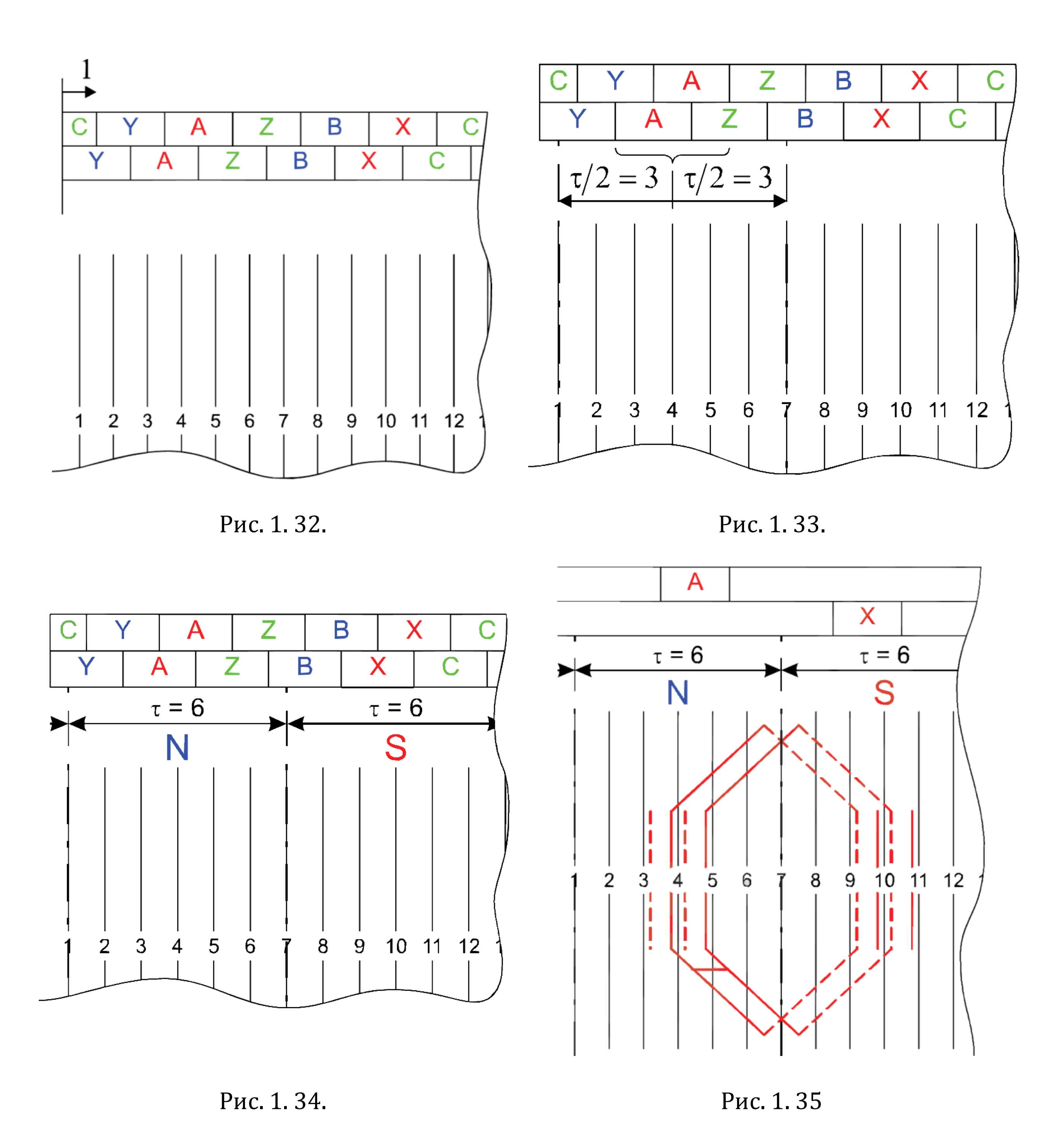


Рис. 1. 32.

Рис. 1. 33.

Рис. 1. 34.

Рис. 1. 35

Соединения проводников в катушки выполняется так же. Первый проводник фазной зоны *A* верхнего слоя с первым проводником фазной зоны *X* нижнего слоя и т. д. Таким образом, из–за сдвига фазных зон получаем нужное значение шага *y.*

Соединения для остальных фаз выполняются аналогично.

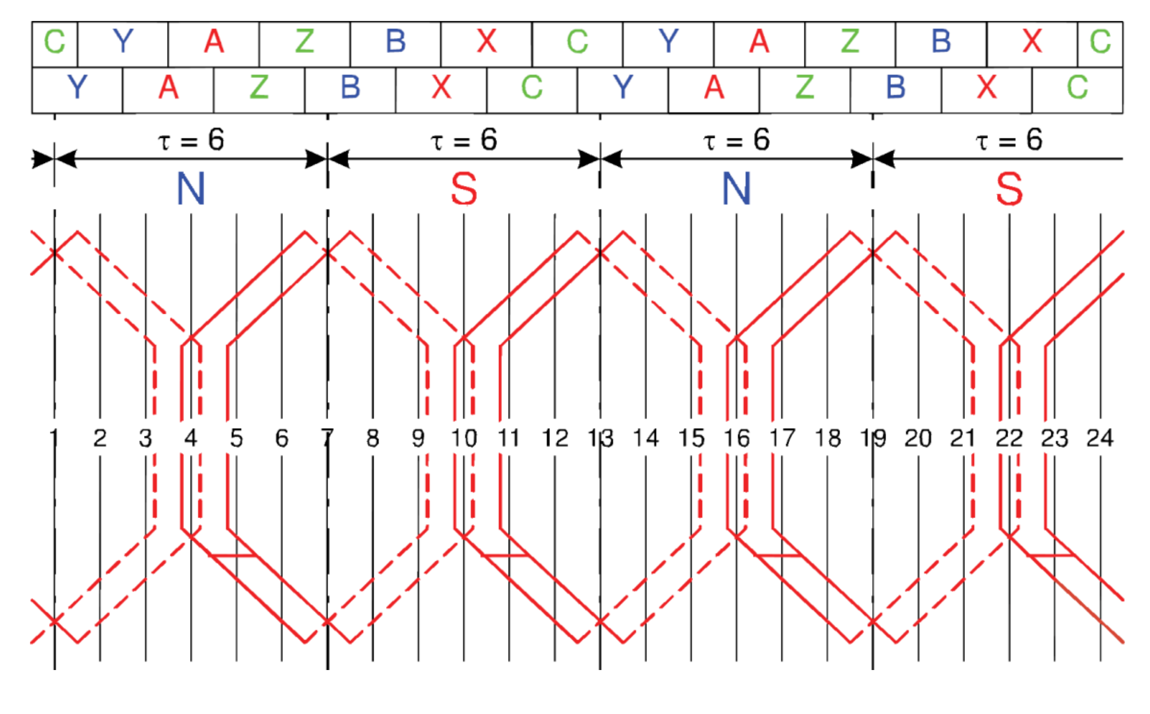


Рис. 1. 36.

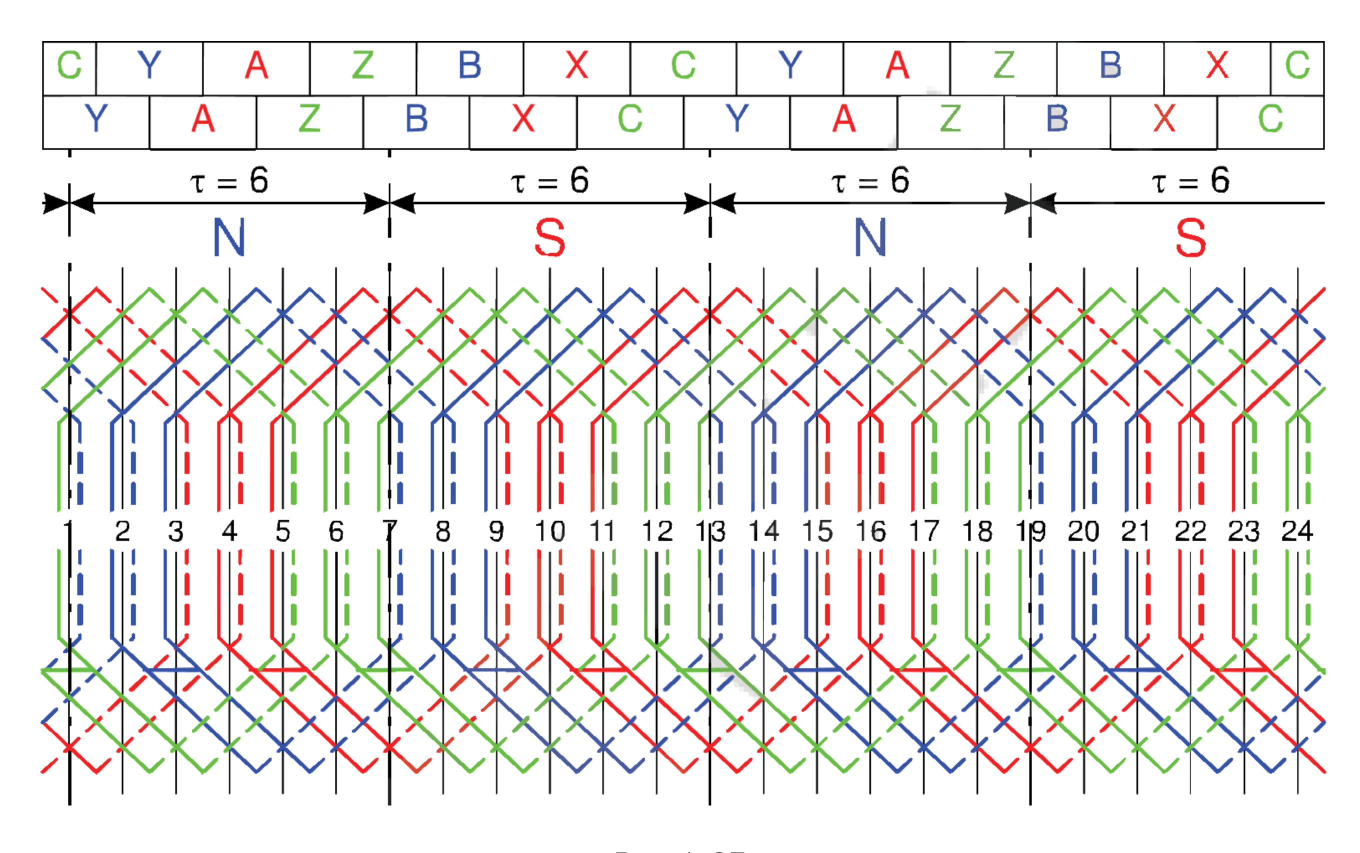


Рис. 1. 37.

Соединения катушечных групп в обмотку фазы выполняются так же, как и для двухслойной обмотки с полным шагом. В данном случае число параллельных ветвей $a = 2$. Для каждой фазы 4 катушечные группы. Соответственно в каждой параллельной ветви по 2 группы, соединенных последовательно. Ветви соединяются между собой параллельно. Для остальных фаз аналогично. Полностью построенная обмотка изображена на рис. 1. 40.

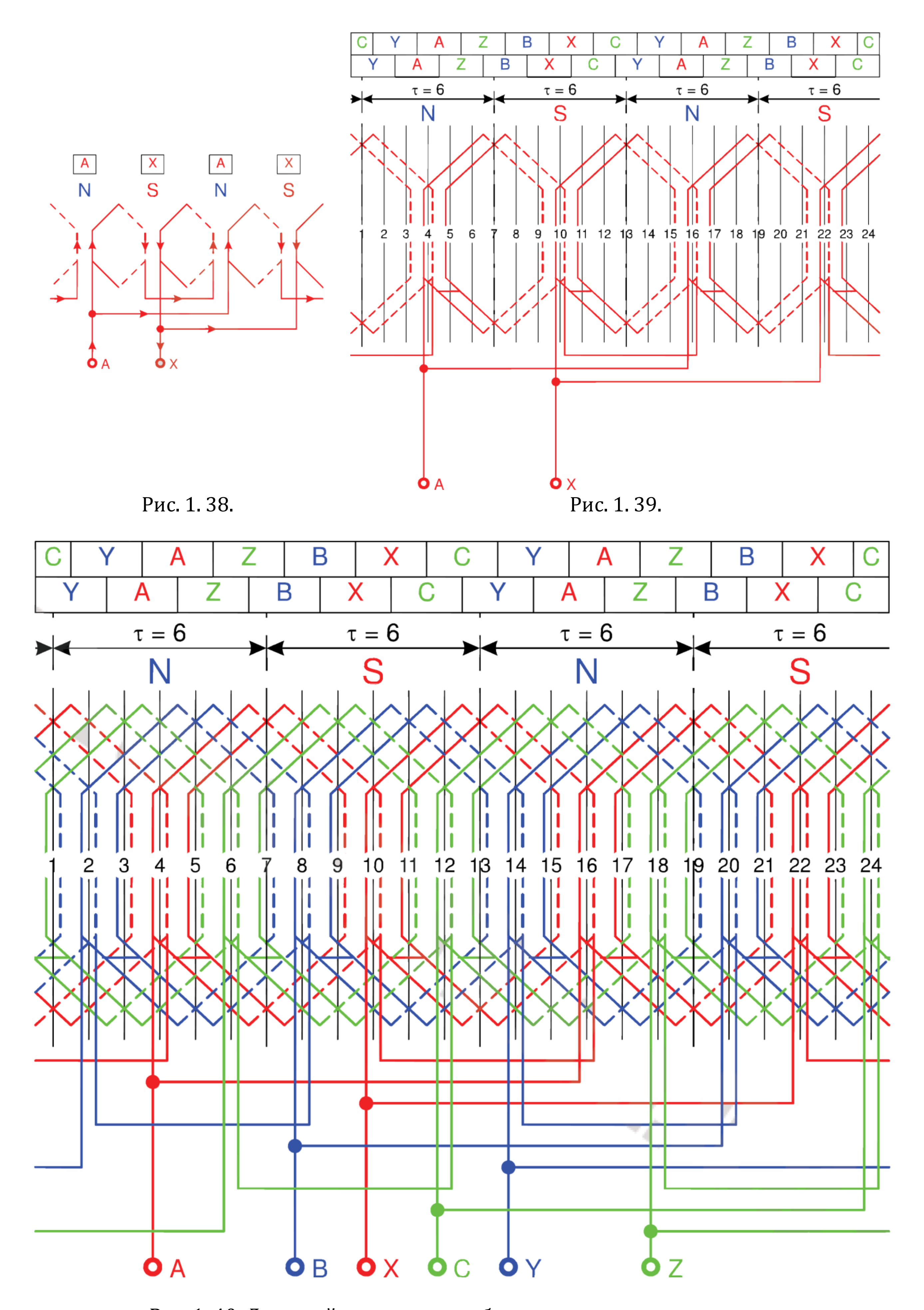


Рис. 1. 38.

Рис. 1. 39.

Рис. 1. 40. Двухслойная петлевая обмотка с укороченным шагом.

2. Обмотки электродвигателей постоянного тока.

Типы обмоток двигателей постоянного тока:

1. Петлевая. 2. Волновая.

Простые обмотки образуют одну замкнутую на себя систему проводников. Сложные обмотки образуют одну (однократно замкнутые) или несколько (многократно замкнутые) таких систем. Параметры обмоток:

1) m – число замкнутых на себя систем проводников;
2) p – число пар полюсов ($2p$ – число полюсов);
3) Z – число пазов;
4) τ – полюсное деление;
5) S – число секций;
6) K – число коллекторных пластин;
7) y, yк, y_1, y_2 – шаги обмотки.

Далее будут рассматриваться только обмотки, для которых $Z = S = K$ и $y = y$к. Для этого случая формулы для расчета параметров обмоток приведены в табл. 2. 1.
Секцией обмотки называется группа последовательно соединенных витков, уложенных в одни и те же пазы, и присоединенная к двум коллекторным пластинам, следующим друг за другом по схеме обмотки. Все обмотки машин постоянного тока – двухслойные. На рис. 2. 1 показан вид обмоток с выделенной красным цветом секцией.
Левая сторона каждой секции – проводник верхнего слоя, правая сторона – проводник нижнего слоя. Таким образом, шаги обмотки:
1) y – шаг обмотки по пазам равен расстоянию в пазах между первыми проводниками (проводниками верхнего слоя) двух следующих друг за другом секций;
2) y_1 – первый частичный шаг обмотки равен расстоянию в пазах между двумя проводниками одной секции;
3) y_2 – второй частичный шаг обмотки равен расстоянию в пазах между вторым проводником (проводником нижнего слоя) одной секции и первым проводником (проводником верхнего слоя) следующей секции.
Порядок построения обмоток:
1. Изображаются пазы с двумя проводниками (верхнего и нижнего слоя);
2. В соответствии со значениями шагов обмотки y_1 и y_2 выполняется соединение проводников в обмотку;
3. Изображаются коллекторные пластины. Нумерация пластин соответствует номерам проводников верхнего слоя, с которыми они соединены.
4. Используя значение полюсного деления τ, расставляются полюса.
5. В соответствии с расположением полюсов располагаются щетки и определяется их полярность.
6. Строится звезда *эдс* проводников или секций (построение по векторам *эдс* секций можно производить только для простых волновых обмоток).
7. Используя звезду *эдс* и схему обмотки, строится многоугольник *эдс* проводников или секций.
8. На многоугольнике *эдс* изображаются щетки и коллекторные пластины, которые с ними соединены.
9. На схеме обмотки и многоугольнике *эдс* показываются уравнительные соединения, если они присутствуют в обмотке.

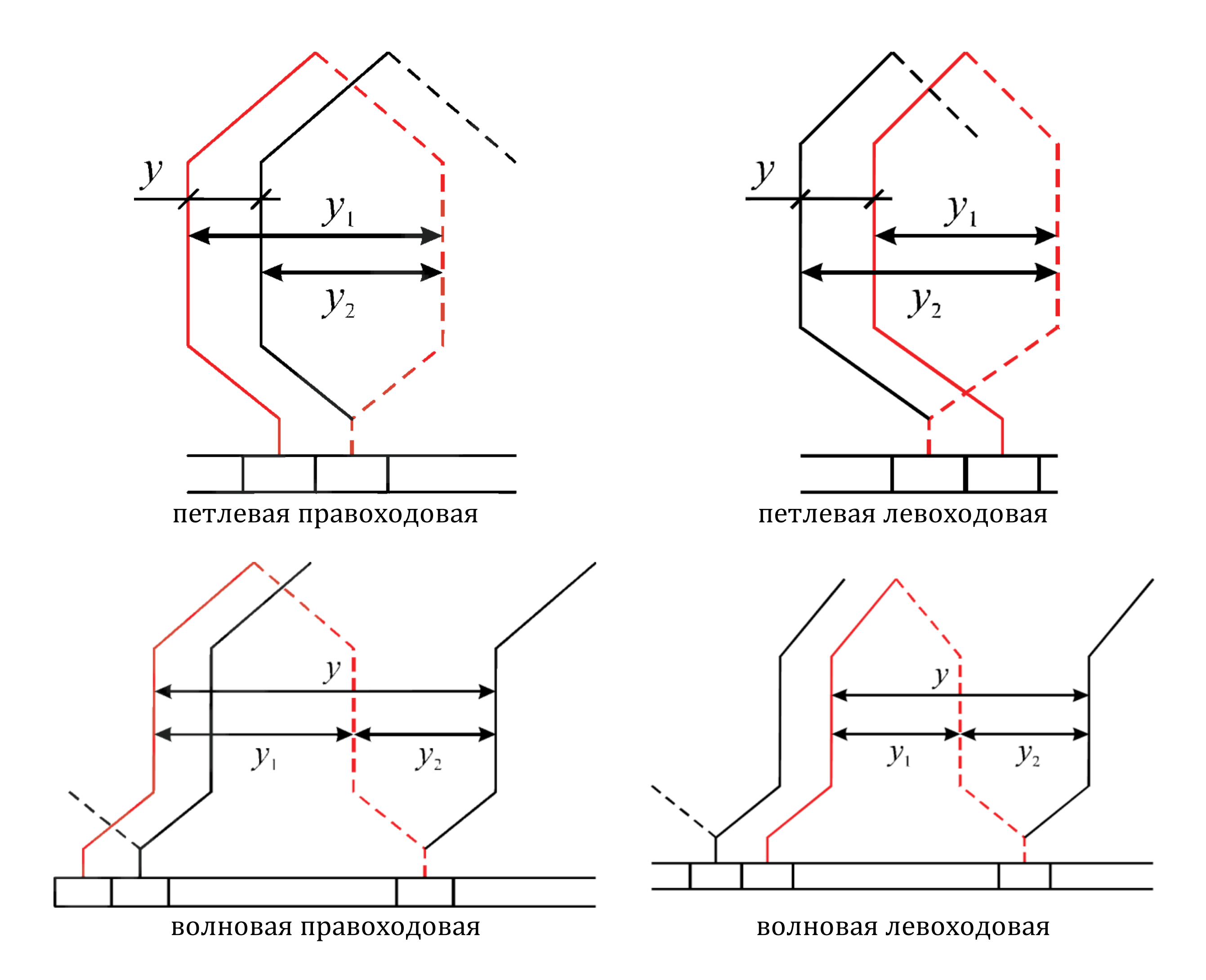


Рис. 2. 1.

Таблица 2. 1. Параметры обмоток постоянного тока.

Параметр		Петлевая		Волновая	
		Правоходовая (не перекре–щивающаяся)	Левоходовая (перекрещи-вающаяся)	Правоходовая (перекрещи-вающаяся)	Левоходовая (не перекре–щивающаяся)
Шаг обмотки y	Простая	1	– 1	$\frac{Z+1}{p}$	$\frac{Z-1}{p}$
	Сложная	m	– m	$\frac{Z+m}{p}$	$\frac{Z-m}{p}$
Первый частичный шаг обмотки y_1	Укороченный шаг	$\frac{Z}{2p} - \varepsilon, 0 < \varepsilon \leq 1$			
	Полный шаг	$\frac{Z}{2p} \pm$			
	Удлиненный шаг	$\frac{Z}{2p} + \varepsilon, 0 < \varepsilon \leq 1$			
Второй частичный шаг обмотки y_2		$y - y_1$			
Угол между векторами *эдс* проводников соседних пазов α		$\frac{2p \times 180}{Z}$			
Положение положи-тельной щетки		N	S	S	N

2. 1. Простая петлевая правоходовая обмотка с удлиненным шагом.

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:
1. Число пар полюсов p = 2, число полюсов $2p$ = 4.
2. Число пазов Z = 14.
3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{14}{4} = 3.5$$

4. Шаг обмотки (для петлевой правоходовой): y – 1.
5. Первый частичный шаг (удлиненный):

$$y_1 = \frac{Z}{2p} + \varepsilon = \frac{14}{4} + \frac{2}{4} = 34$$

6. Второй частичный шаг:

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3$$

7. Угол между векторами *эдс* соседних пазов:

$$\alpha = \frac{2p \times 180^{o}}{Z} = \frac{4 \times 180^{o}}{14} = 51{,}43^{o}$$

Изображаем пазы и проводники. Проводник верхнего слоя изображается сплошной линией немного левее оси паза, нижнего слоя – штриховой линией немного правее оси паза. Нумерация проводников соответствует номерам пазов. Проводники верхнего слоя обозначаются номером с одним штрихом, нижнего слоя – с двумя штрихами.
Выполняем соединение проводников в обмотку. Сверху соединяем проводник верхнего слоя с проводником нижнего слоя, двигаясь по обмотке вправо и используя значение первого частичного шага y_1. Снизу соединяем проводник нижнего слоя с проводником верхнего слоя, используя значение второго частичного шага y_2. Направление движения по обмотке определяется знаком y_2. При положительном значении двигаемся слева направо, при отрицательном – справа налево.

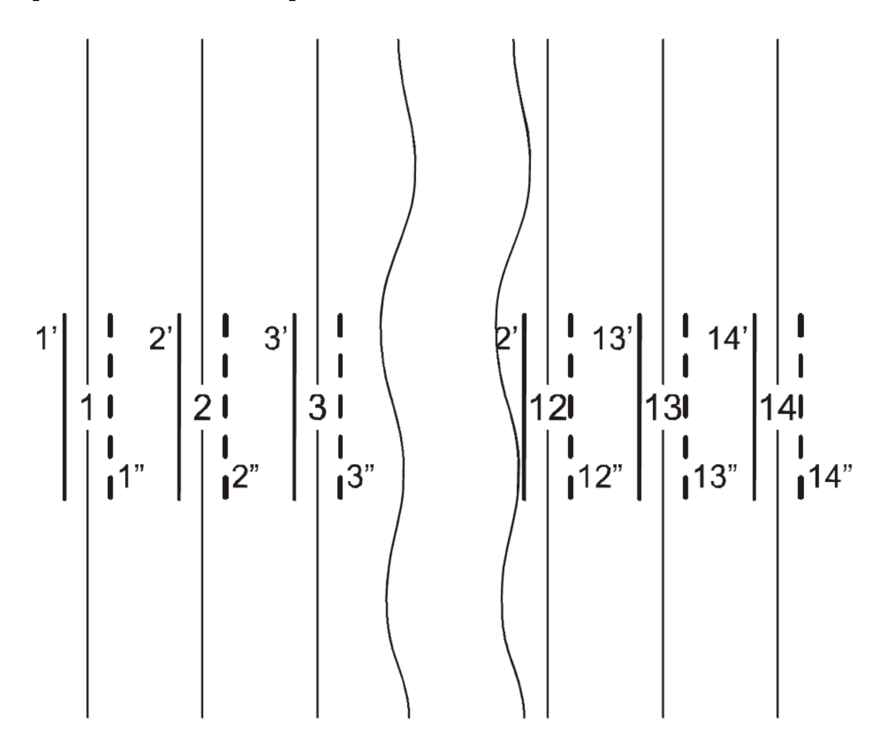


Рис. 2. 2.

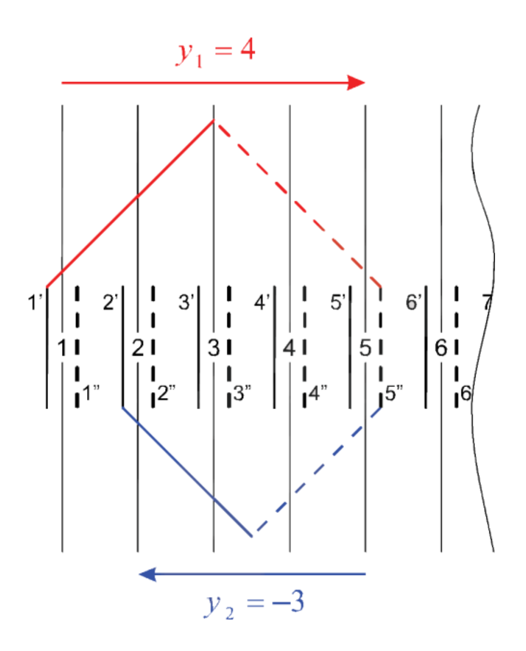


Рис. 2. 3.

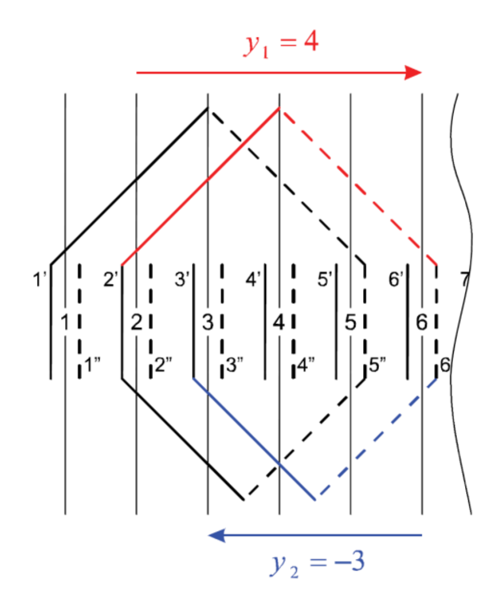


Рис. 2. 4.

Для простых петлевых обмоток после полного обхода всего якоря приходим в проводник, с которого начинали, и получаем замкнутую на себя систему проводников.

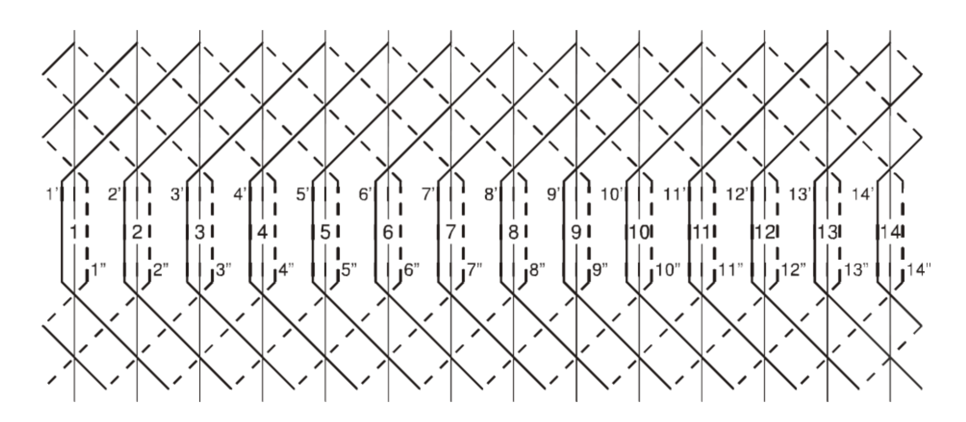


Рис. 2. 5.

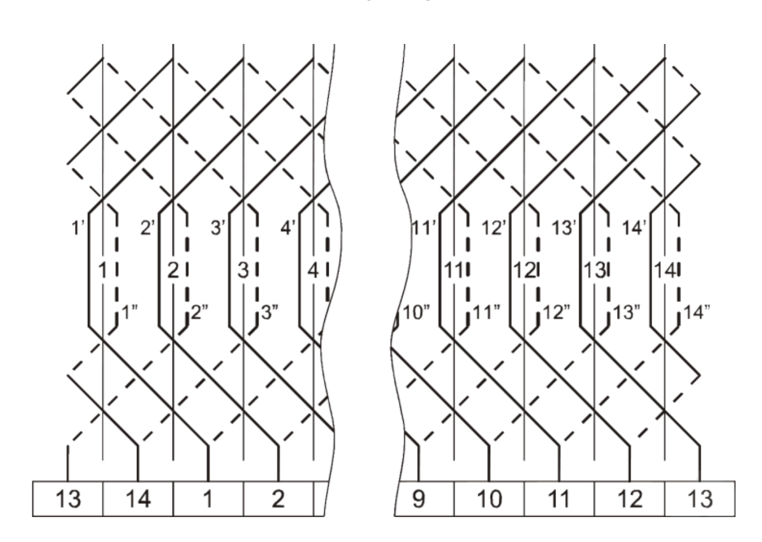


Рис. 2. 6.

Снизу от проводников изображаются коллекторные пластины. Ширина пластины равна расстоянию между пазами. Нумерация пластин соответствует номерам проводников верхнего слоя, с которыми они соединены.

Выбираем произвольно паз (например 4), напротив которого располагаем центр южного полюса. Впоследствии, при построении звезды *эдс* проводников, вектор *эдс* проводников этого паза будет направлен вертикально вверх. Центры остальных полюсов расположены на расстоянии полюсного деления τ. Ширина полюса берется равной примерно 60…70% полюсного деления.

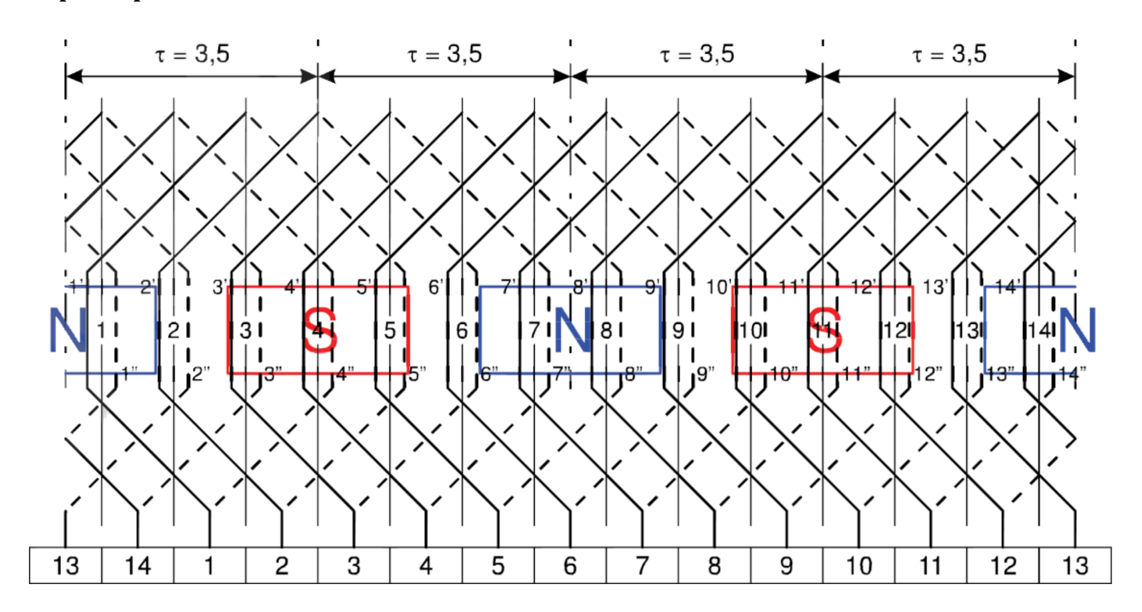


Рис. 2. 7.

Располагаем щетки напротив центров полюсов. Согласно таблице 2. 1 выбираем полярность щеток. Для простых обмоток ширина щетки равна ширине одной коллекторной пластины.

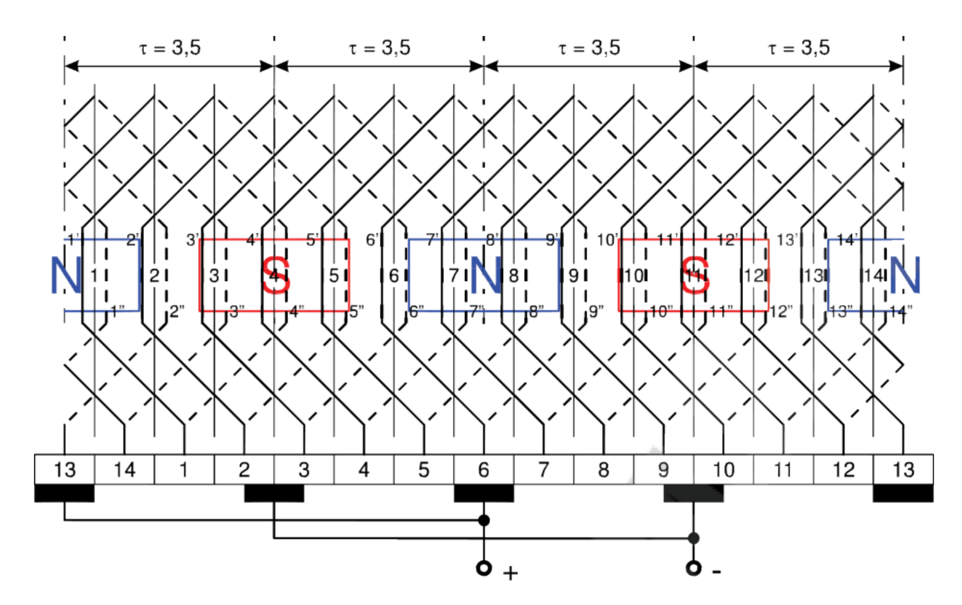


Рис. 2. 8.

При построении звезды *эдс* проводников вначале ставим направленный вертикально вверх вектор *эдс* проводников паза, напротив которого ранее был размещен центр южного полюса. Затем, двигаясь по обмотке вправо, строим вектора *эдс* проводников остальных пазов, каждый раз откладывая по часовой стрелке угол α.

В процессе построения звезды совершаем полных оборотов столько, сколько пар полюсов. Поскольку для рассматриваемого примера число пазов делится нацело на число пар полюсов, то вектора *эдс* проводников, расположенных в пазах, отстоящих друг от друга на τ будут совпадать.

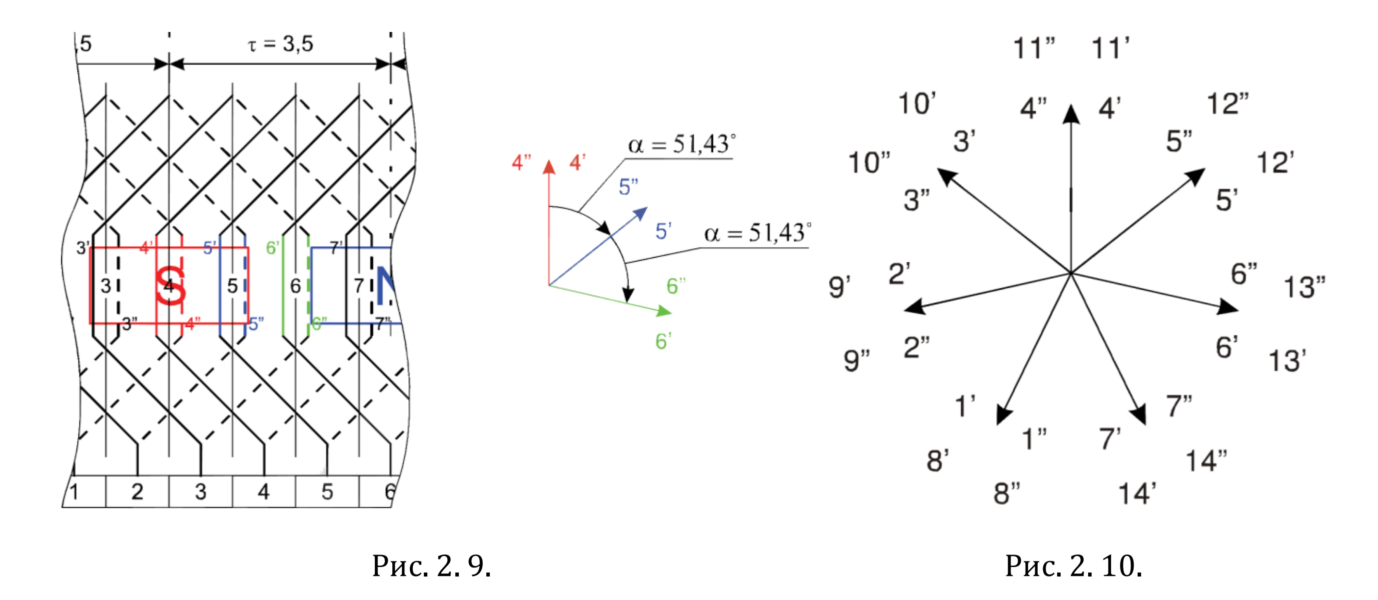


Рис. 2. 9.

Рис. 2. 10.

Многоугольник *эдс* начинаем строить с вектора проводника верхнего слоя в том пазу, напротив которого расположили центр южного полюса. Затем пристраиваем друг к другу вектора *эдс* проводников, следующих друг за другом по схеме обмотки. При этом вектора *эдс* проводников нижнего слоя переворачиваем на 180°, поскольку для них направление обхода (сверху вниз) противоположно условно положительному направлению *эдс* (снизу вверх).

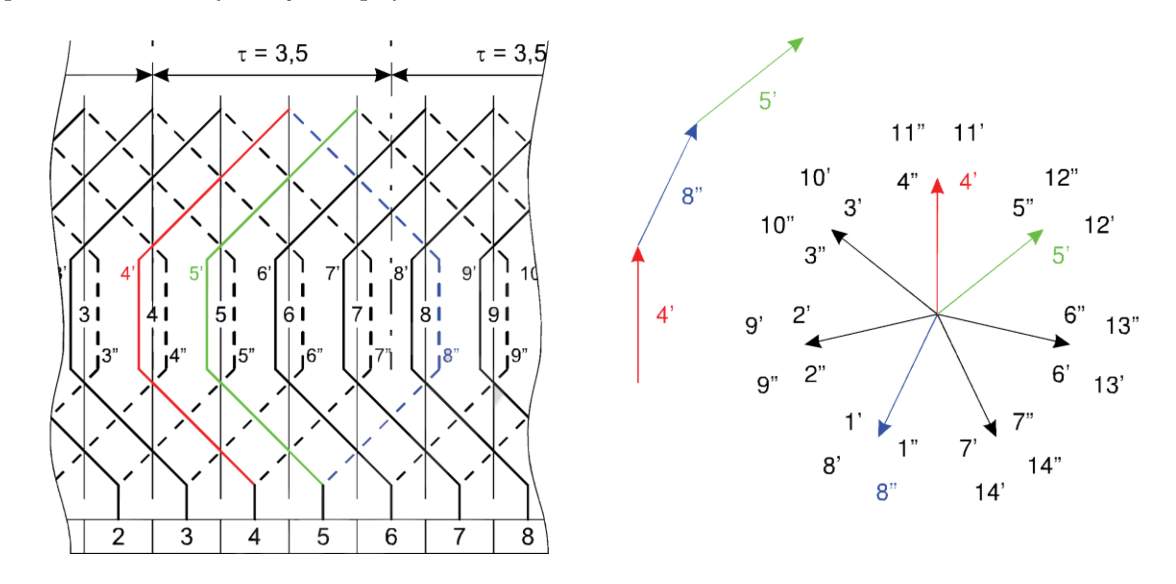


Рис. 2. 11.

Для простых петлевых обмоток при построении многоугольника число полных оборотов равно числу пар полюсов. При этом для каждого оборота длина векторов немного увеличивается. Таким образом, получаются вложенные друг в друга многоугольники, число которых равно числу пар полюсов *p*.

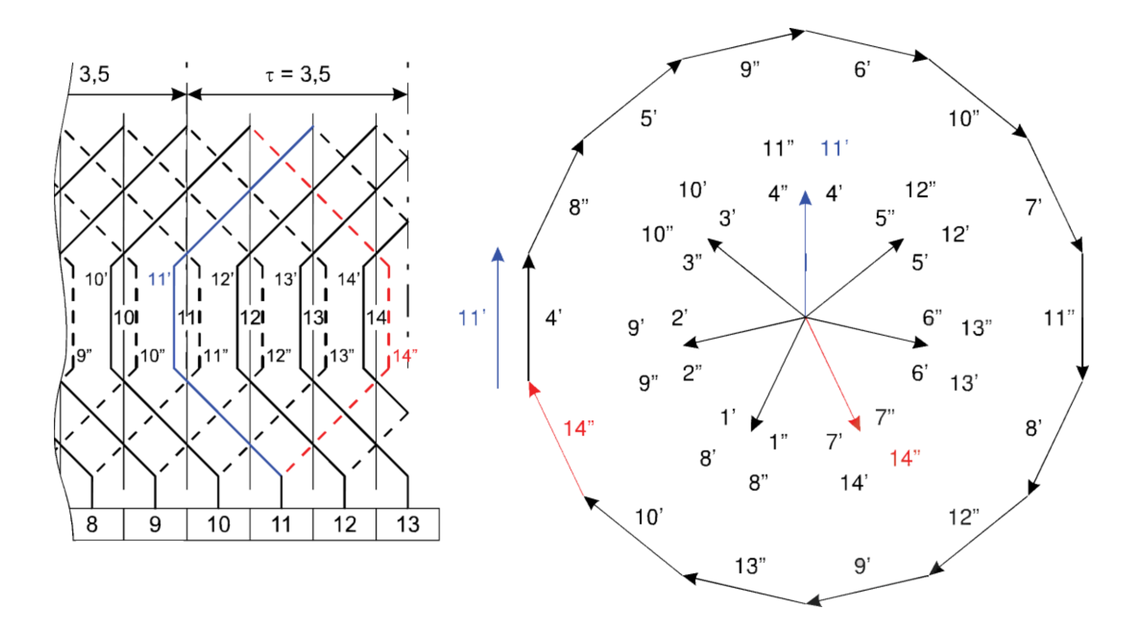


Рис. 2.12.

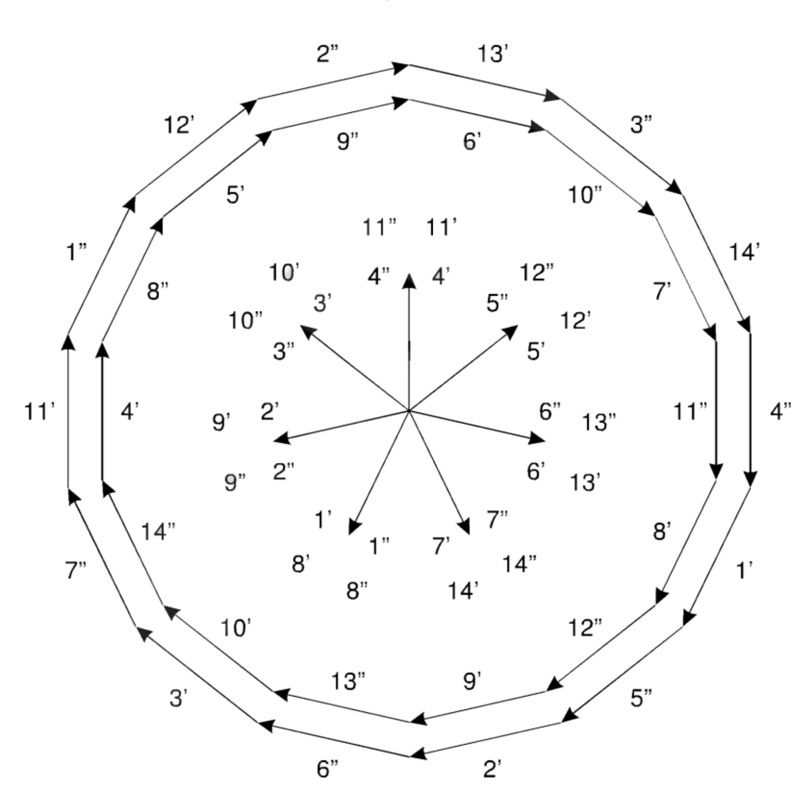


Рис. 2. 13.

Изображаем на многоугольнике щетки и соединенные с ними коллекторные пластины. Поскольку коллекторные пластины соединены с началом проводников верхнего слоя, то коллекторные пластины соединяем на многоугольнике с началами векторов *эдс* этих проводников. Щетки должны находиться на геометрической нейтрали – вертикальной оси многоугольника. Положительные – сверху, отрицательные – снизу. Если это условие не выполняется, то в построениях допущена ошибка. Щетки могут закорачивать секции, *эдс* которых равно или близко к нулю. В данной обмотке секции 2 (проводники 2' и 6") и 9 (проводники 9' и 13"). По многоугольнику видно, что обмотка образует между щетками 4 параллельных ветви. Для простых петлевых обмоток число параллельных ветвей равно числу полюсов. Несколько многоугольников получается из –за увеличения размера векторов. То есть на самом деле соответствующие вершины всех многоугольников – точки с одинаковым потенциалом.

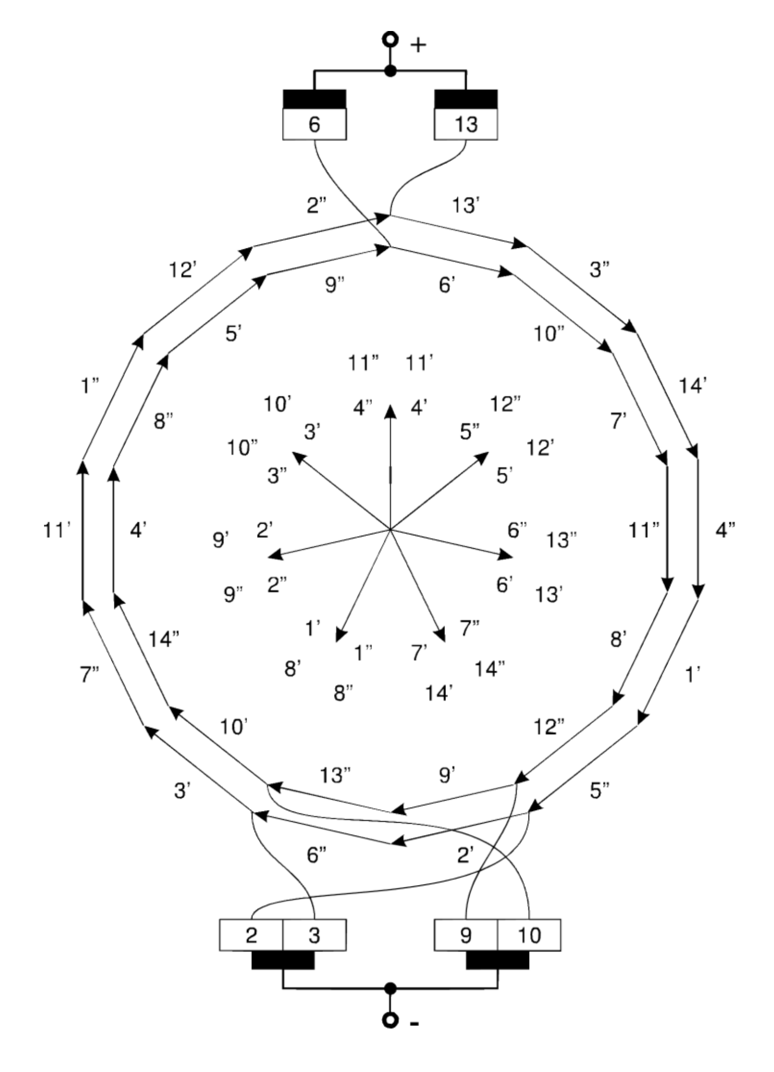


Рис. 2. 14.

Для выравнивания потенциалов в этих точках применяются уравнительные соединения первого рода. На чертеже обмотки и на многоугольнике изображается только один уравнитель, хотя их в обмотке несколько. Уравнители выполняются обычно в лобовых частях, противоположных коллектору. Поэтому они находятся в вершинах многоугольников, соответствующих началам векторов *эдс* проводников нижнего слоя. Выберем на внешнем многоугольнике вершину между векторами 3’ и 7”. Соответствующая вершина на внутреннем – между векторами 10’ и 14”. Соединим их на векторной диаграмме.

На чертеже обмотки соответственно нужно соединить точку между проводниками 3’ и 7” с точкой между 10’ и 14”. Полностью построенные обмотка и векторная диаграмма *эдс* показаны на рис. 2. 15 и 2. 16.

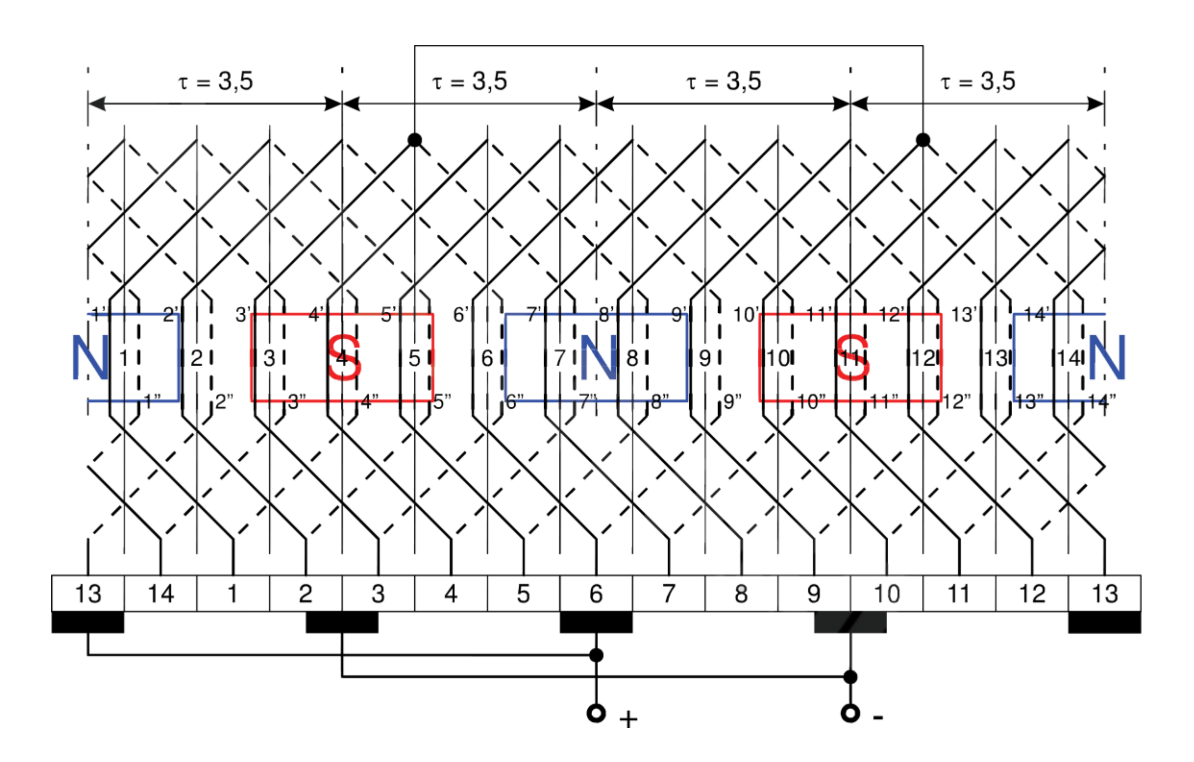


Рис. 2. 15. Петлевая правоходовая обмотка с удлиненным шагом.

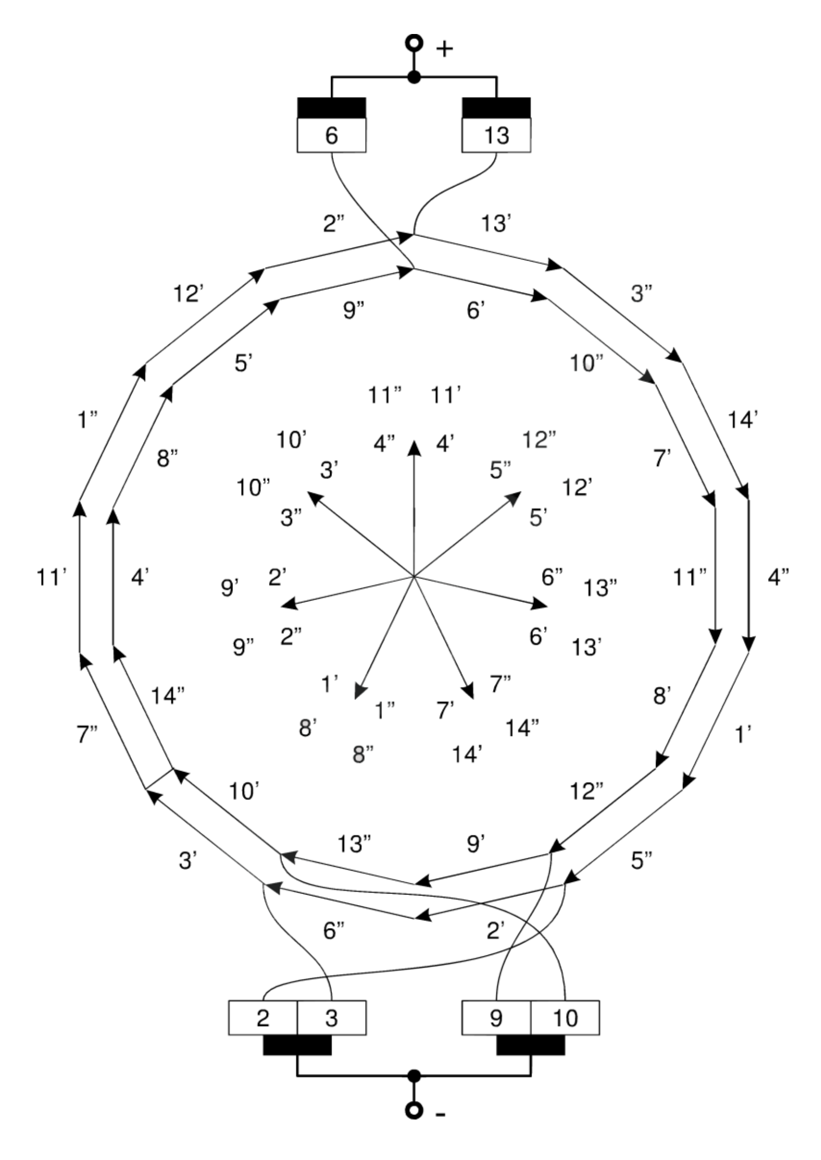


Рис. 2. 16. Звезда и многоугольник *эдс* проводников
петлевой правоходовой обмотки с удлиненным шагом.

2. 2. Простая волновая левоходовая обмотка с укороченным шагом.

Рассмотрим на примере обмотки со следующими параметрами:
1. Число пар полюсов $p = 2$, число полюсов $2p = 4$.
2. Число пазов $Z = 13$.
3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{13}{4} = 3{,}25$$

4. Шаг обмотки (для петлевой правоходовой):

$$y = \frac{Z-1}{p} = \frac{13-1}{2} = 6$$

5. Первый частичный шаг (укороченный):

$$y_1 = \frac{Z}{2p} - \varepsilon = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3$$

6. Второй частичный шаг:

$$y_2 = y - y_1 = 6 - 3 = 3$$

7. Угол между векторами *эдс* соседних пазов:

$$\alpha = \frac{2p \times 180^{\circ}}{Z} = \frac{4 \times 180^{\circ}}{13} = 55{,}385^{\circ}$$

Изображаем пазы и проводники верхнего и нижнего слоев. Нумерация проводников соответствует номерам пазов. Проводники верхнего слоя обозначаются номером с одним штрихом, нижнего слоя – с двумя штрихами.

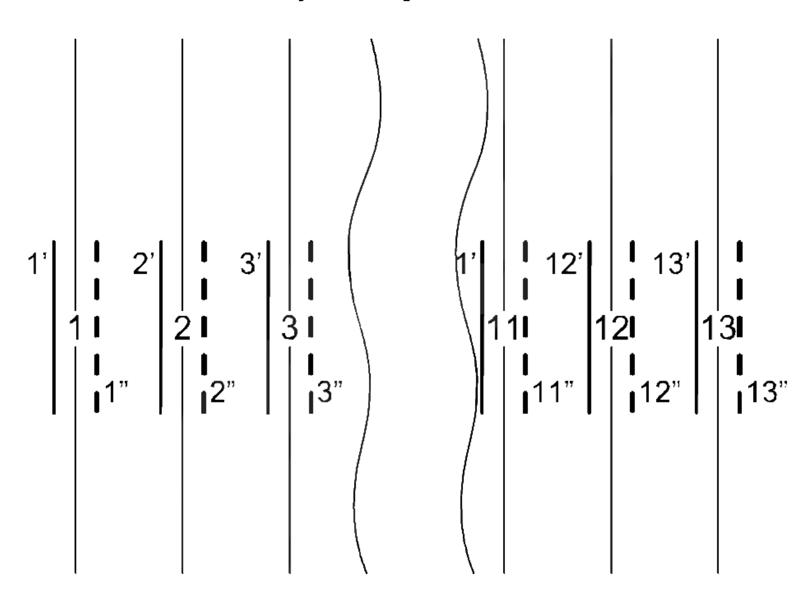


Рис. 2. 17.

Выполняем соединение проводников в обмотку. Сверху соединяем проводник верхнего слоя с проводником нижнего слоя, двигаясь по обмотке вправо и используя значение первого частичного шага y_1. Снизу соединяем проводник нижнего слоя с проводником верхнего слоя, используя значение второго частичного шага y_2. Направление движения по обмотке определяется знаком y_2. При положительном значении двигаемся слева направо.

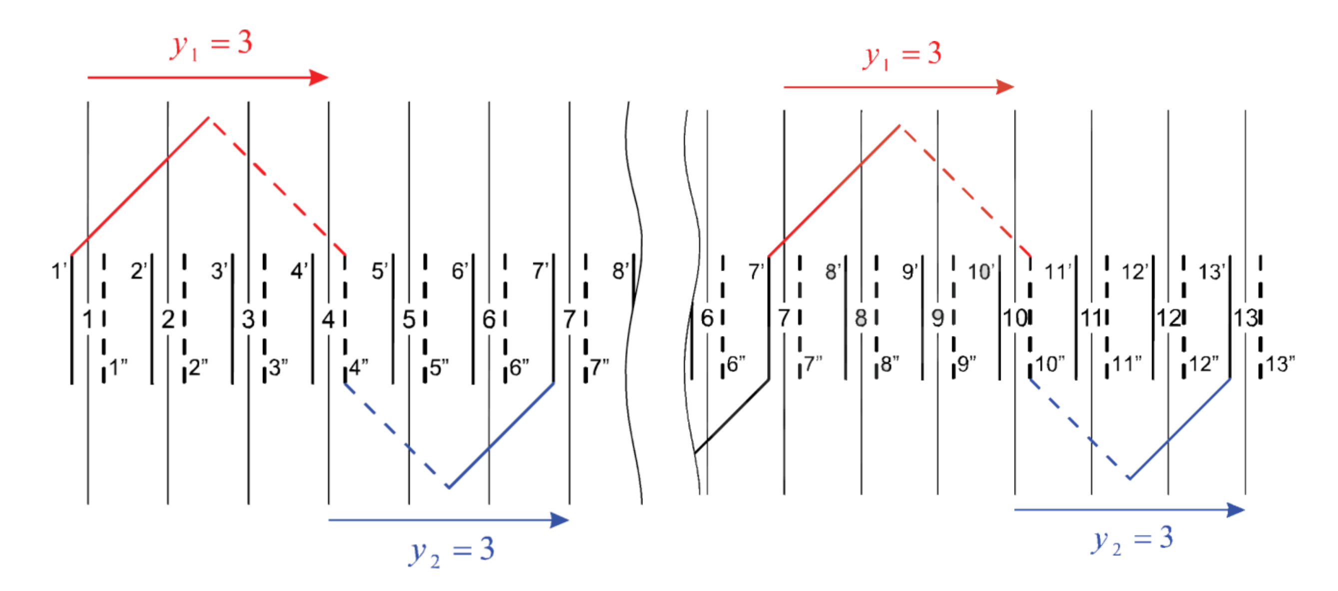


Рис. 2. 18 Рис. 2. 19.

Соединения выполняем до тех пор, пока не придем в проводник с которого начинали. При этом получаем замкнутую на себя систему проводников.

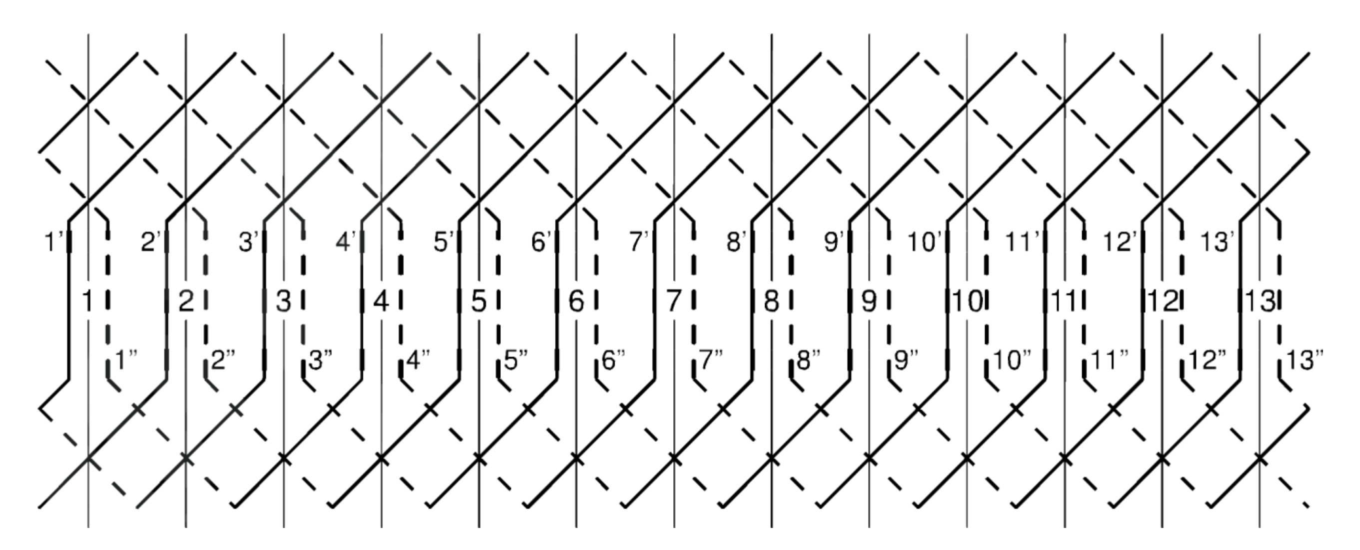


Рис. 2. 20.

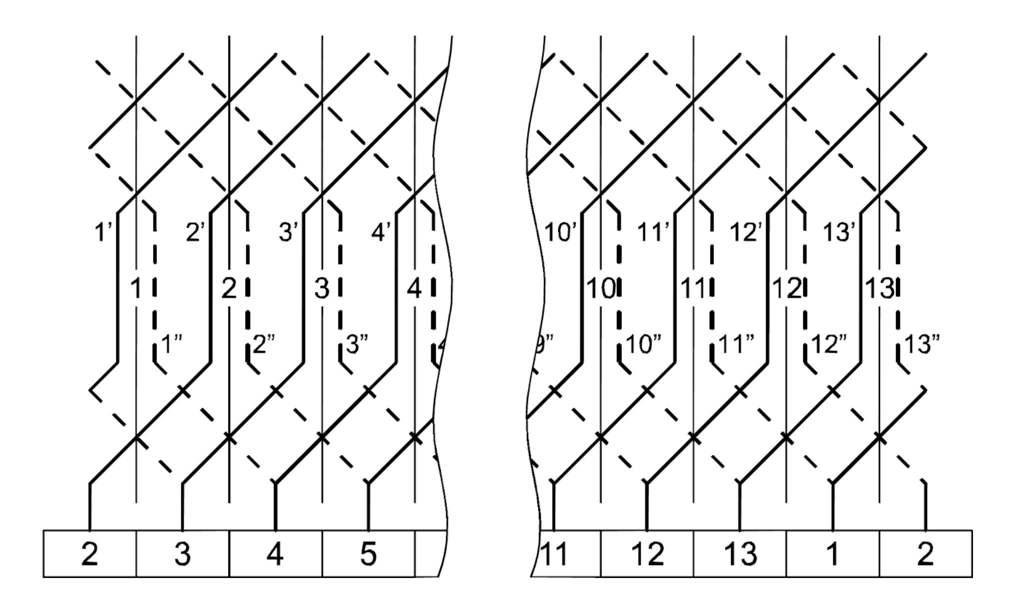


Рис. 2. 21.

Снизу от проводников изображаем коллекторные пластины. Нумерация пластин соответствует номерам проводников верхнего слоя, с которыми они соединены.

Выбираем произвольно паз (например 4), напротив которого располагаем центр южного полюса. Вектор *эдс* проводников этого паза будет направлен вертикально вверх. Центры остальных полюсов расположены на расстоянии полюсного деления τ. Ширина полюса берется равной примерно 60…70 % полюсного деления.

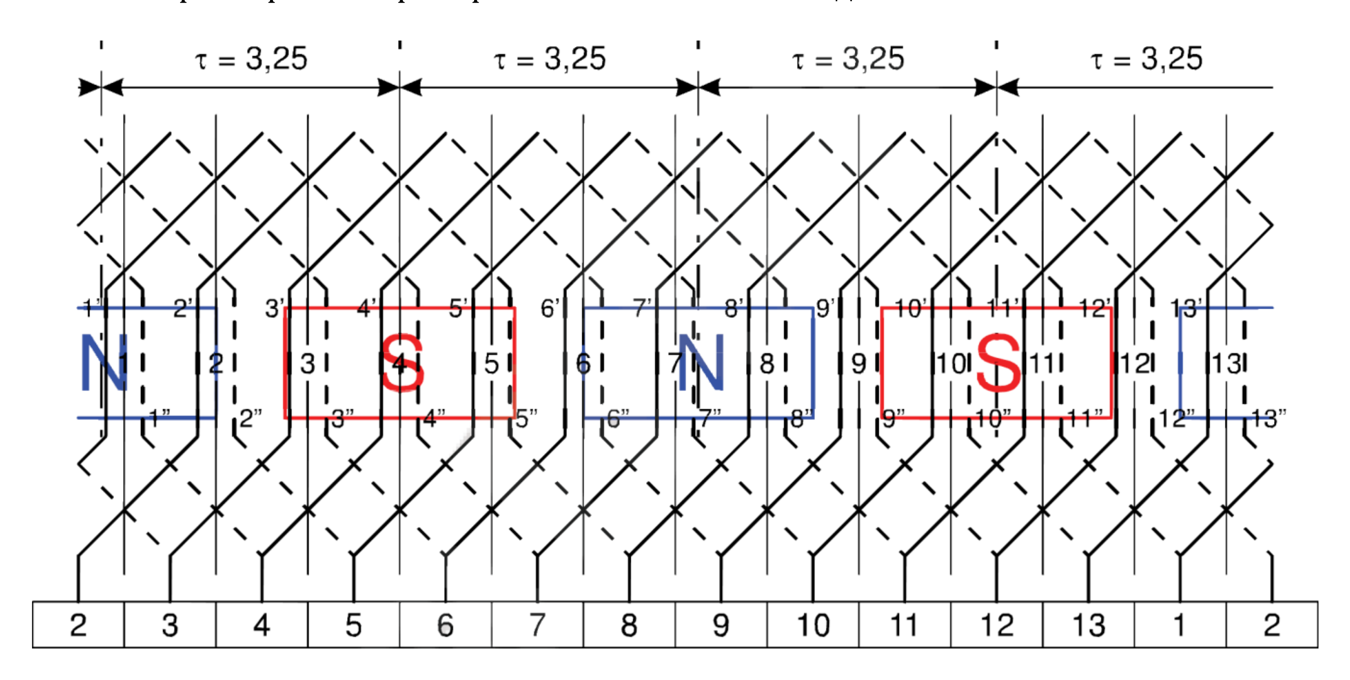


Рис. 2. 22.

Располагаем щетки напротив центров полюсов. Согласно табл. 2. 1 положительные щетки расположены под северными полюсами. Для простых обмоток ширина щетки равна ширине одной коллекторной пластины. Полностью построенная обмотка показана на рис. 2. 23.

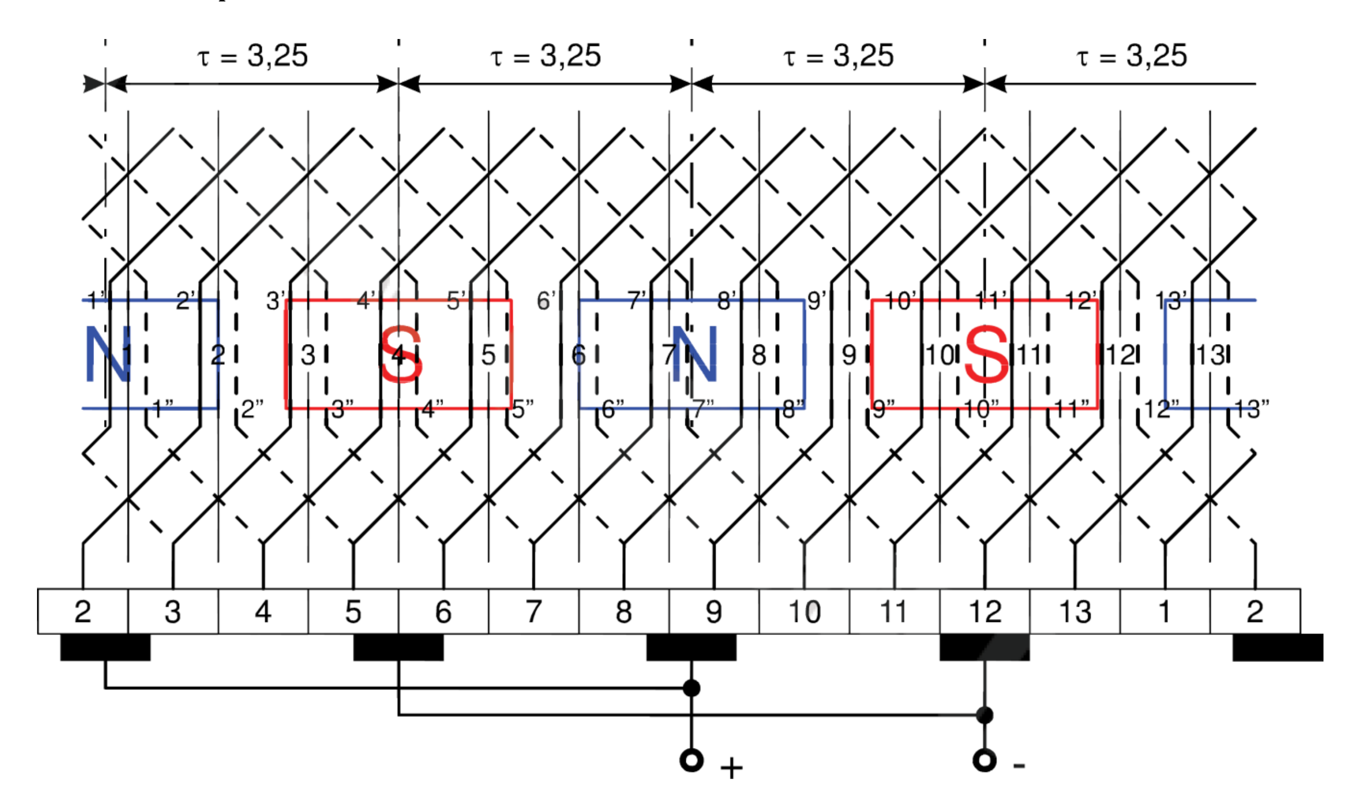


Рис. 2. 25. Волновая левоходовая обмотка с укороченным шагом.

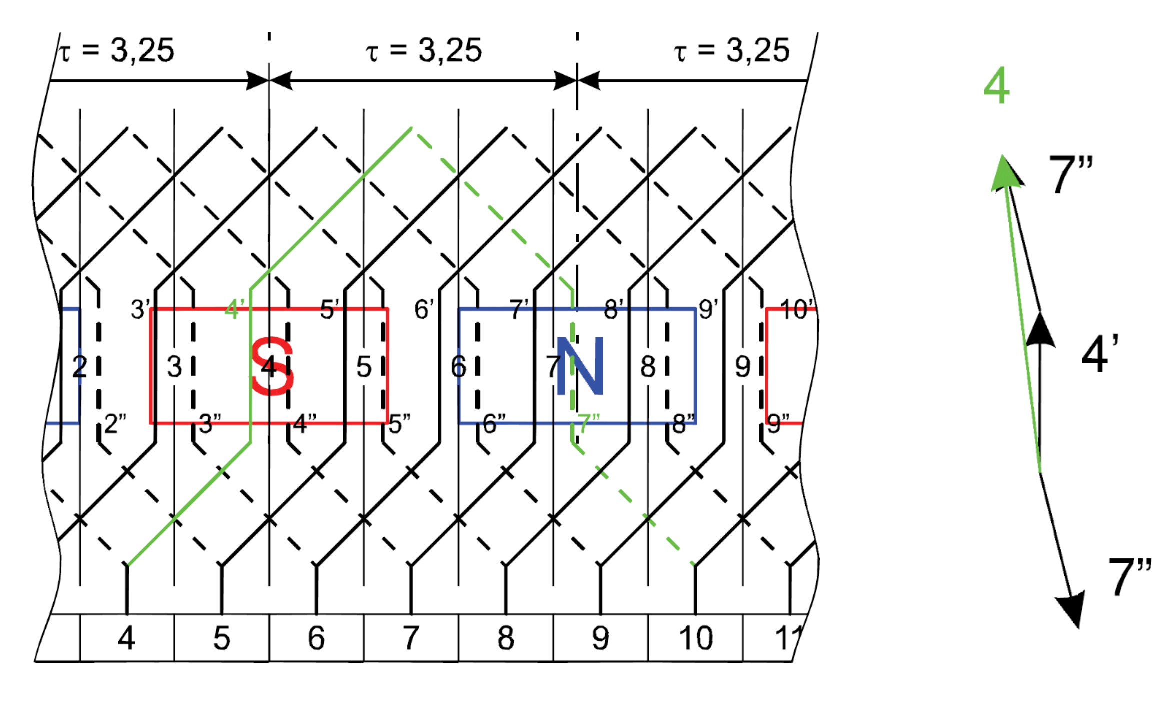


Рис. 2. 24.

Рис. 2. 25.

Для простой волновой обмотки звезду и многоугольник *эдс* можно строить по векторам *эдс* секций. Начинаем построение с вектора *эдс* секции 4, в которую входит проводник 4’, вектор *эдс* которого направлен вертикально вверх.
В секцию 4 также входит проводник 7”, вектор *эдс* которого повернут относительно вертикали по часовой стрелке на угол:

$$y_1 \times \alpha = 3 \times 55{,}385° = 166{,}155°$$

Пристроив к вектору 4’ вектор 7”, перевернутый на 180°, получим в сумме вектор *эдс* секции 4. Вектора *эдс* остальных секций повернуты относительно друг друга на угол α.

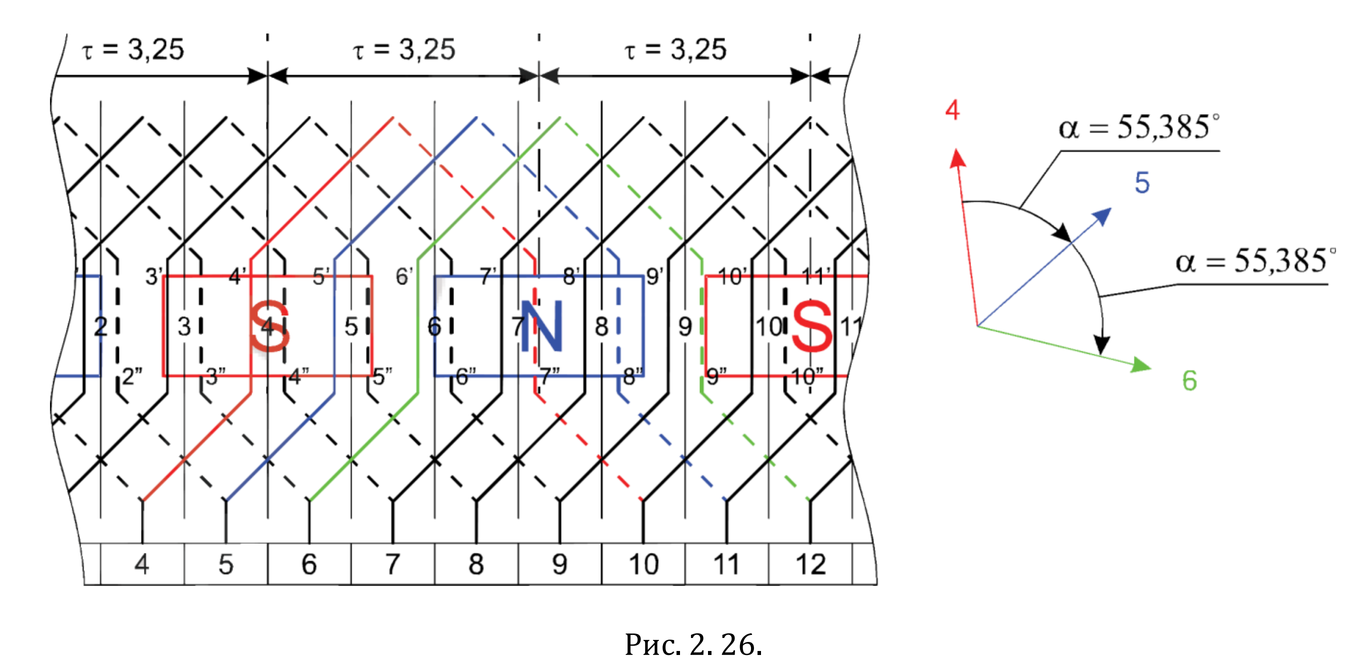


Рис. 2. 26.

В процессе построения звезды совершаем полных оборотов столько, сколько пар полюсов. Многоугольник *эдс* начинаем строить с вектора *эдс* секции 4 (той, с которой начинали звезду). Затем пристраиваем друг к другу вектора *эдс* секций, следующих друг за другом по схеме обмотки. Для простых волновых обмоток при построении многоугольника совершается один полный оборот.

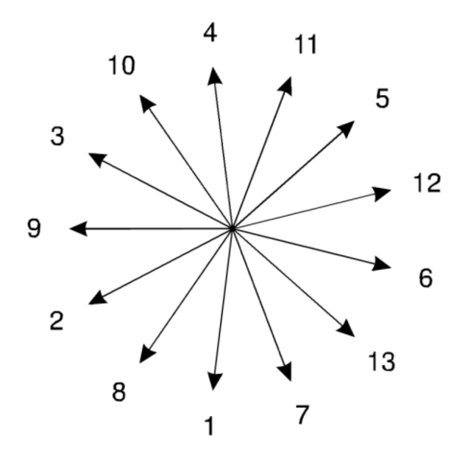


Рис. 2. 27.

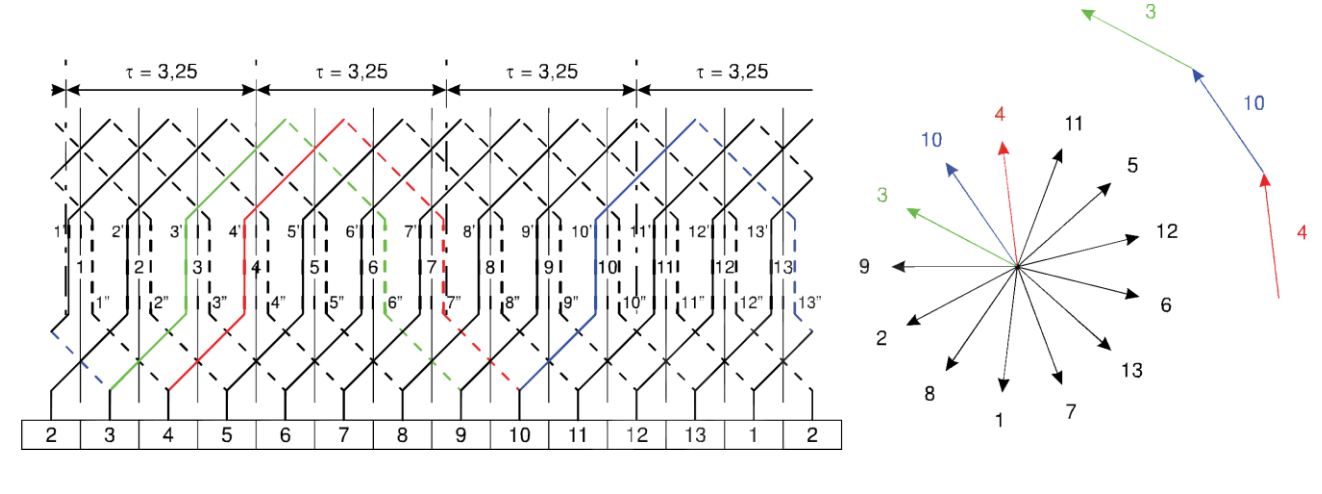


Рис. 2. 28.

Изображаем на многоугольнике щетки и соединенные с ними коллекторные пластины. Поскольку коллекторные пластины соединены с началом проводников верхнего слоя, то соединяем на многоугольнике их с началами векторов *эдс* соответствующих секций. Простые волновые обмотки образуют между щетками 2 параллельных ветви. Результат построения векторной диаграммы *эдс* секций рассматриваемой обмотки показан на рис. 2. 30.

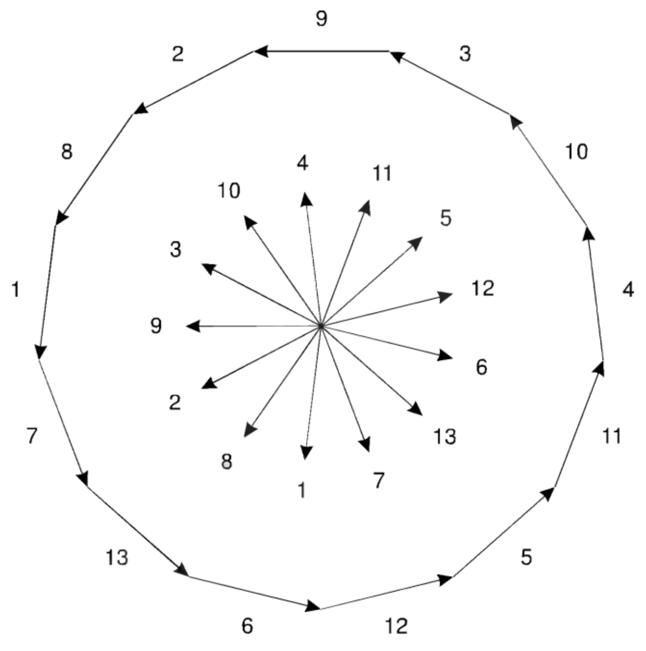


Рис. 2. 29.

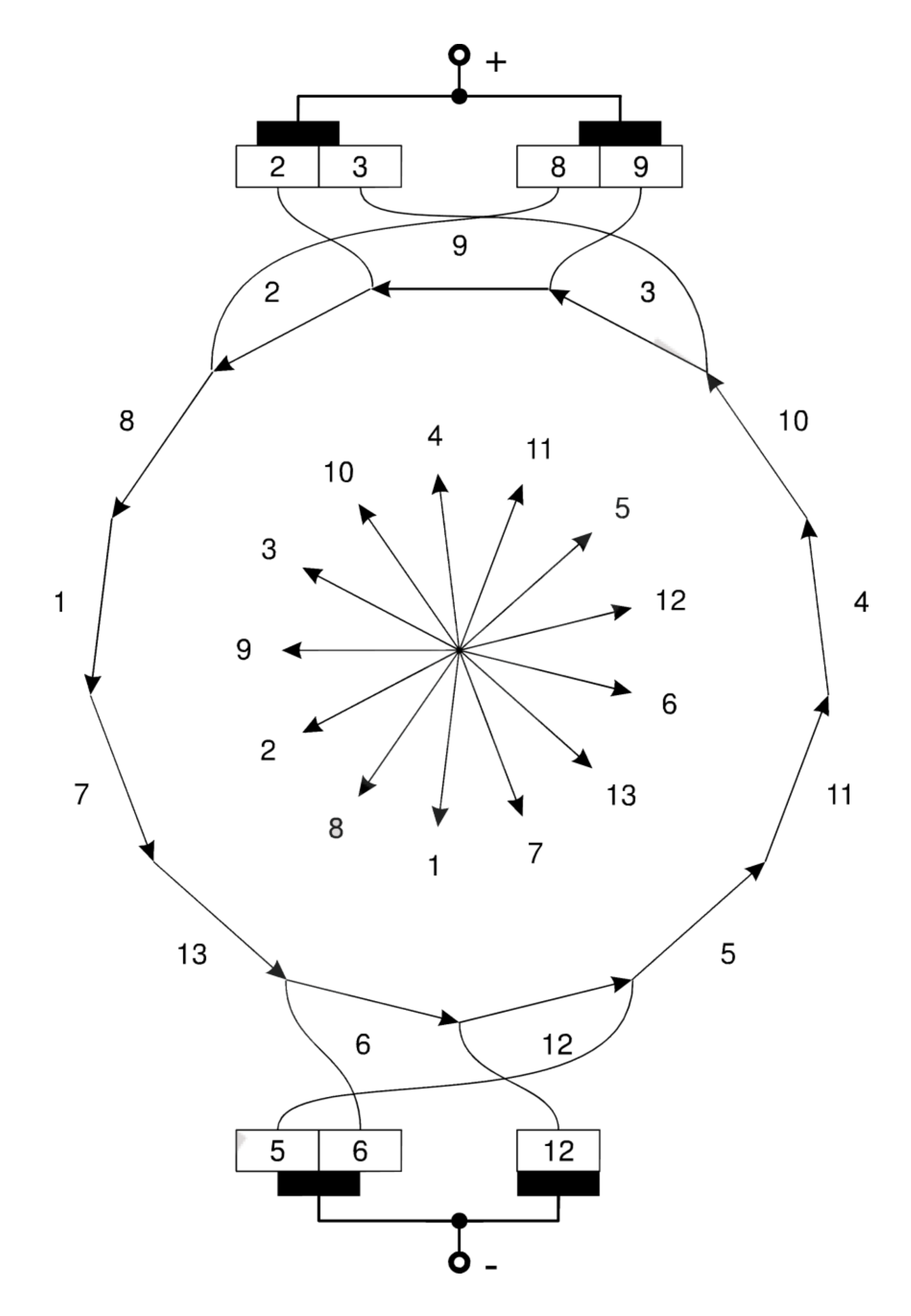


Рис. 2. 30. Звезда и многоугольник *эдс* простой волновой левоходовой обмотки с укороченным шагом.

2. 3. Сложные обмотки.

На рис. 2. 32 показана двухкратнозамкнутая обмотка. Ее параметры:
1. Кратность обмотки $m = 2$.
2. Число пар полюсов $p = 2$, число полюсов $2p = 4$.
3. Число пазов $Z = 28$.
4. Полюсное деление $\tau = 7$.
5. Шаг обмотки $y = 2$.
6. Первый частичный шаг $y_1 = 8$.
7. Второй частичный шаг $y_2 = -6$.
8. Угол между векторами *эдс* соседних пазов $\alpha = 25{,}714°$.

Черным цветом показана замкнутая система, образованная проводниками в нечетных пазах, зеленым – проводниками в четных. Таким образом, при построении сложной обмотки (используя рассчитанные по формулам из табл. 2. 1 значения шагов) вначале строим одну из систем, начав с проводника 1'. Затем, начиная с проводника 2', – вторую систему и т. д.

Многоугольников в многократных обмотках несколько: для петлевых обмоток их количество равно $m \times p$, для волновых – m. Соответственно число параллельных ветвей между щетками $m \times 2p$ для петлевой обмотки и $2 \times m$ для волновой. Вначале строится многоугольник для одной из замкнутых систем проводников, затем для второй и т. д. В рассматриваемом примере для обмотки на рис. 2. 32 вначале, начиная с вектора *эдс* проводника 4’, были построены 2 многоугольника для проводников в четных пазах (изображены зеленым цветом). Затем 2 многоугольника для нечетных пазов, начиная с проводника 5’ (изображены черным цветом). Результат построения показан на рис. 2. 31. Красным цветом на рисунках показан уравнитель 1–го рода, применяемый в петлевых обмотках при $p > 1$. Синим цветом показан уравнитель второго рода, применяемый в многократнозамкнутых обмотках для выравнивания потенциалов между замкнутыми системами проводников.

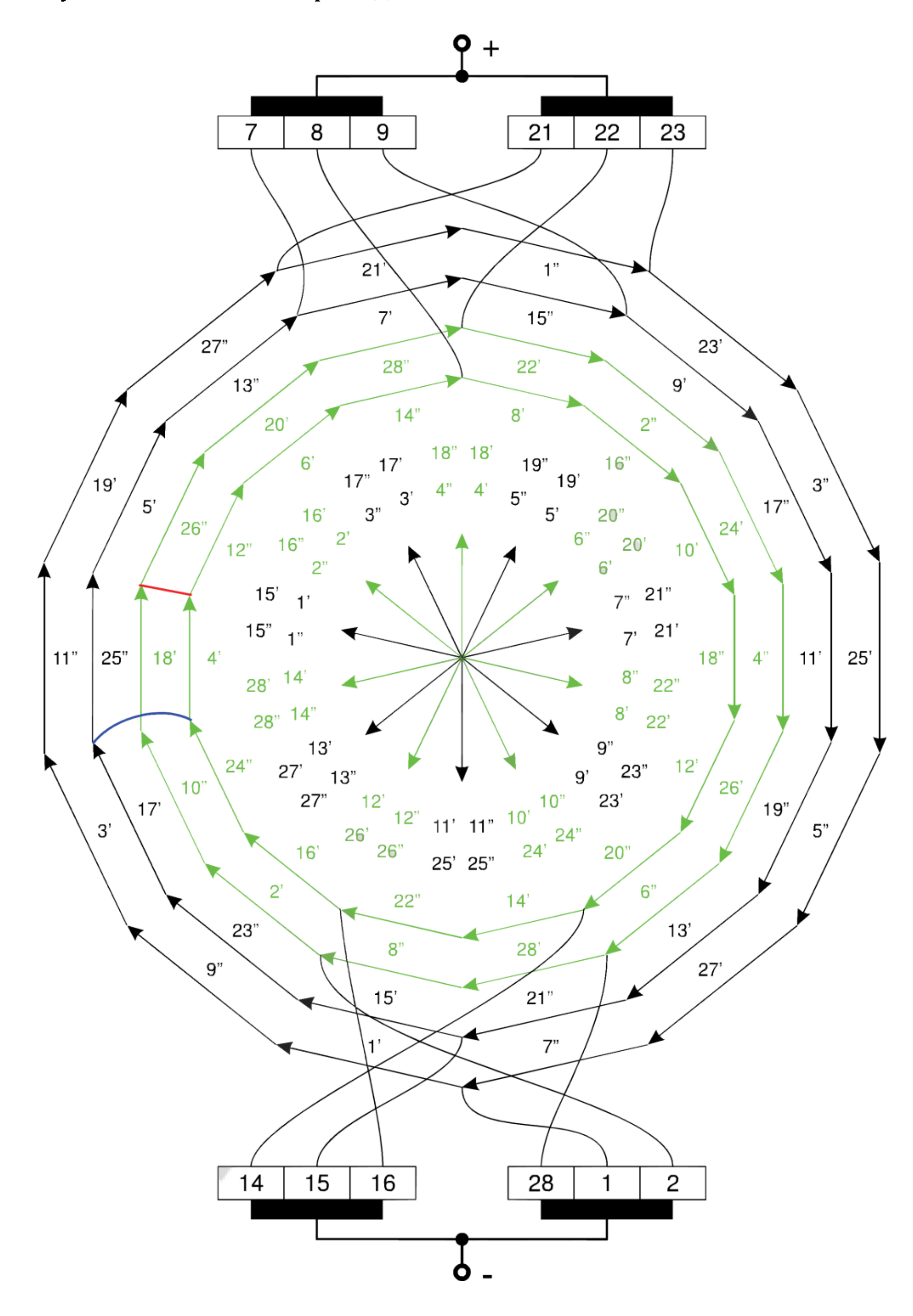


Рис. 2. 30. Звезда и многоугольник *эдс* двухкратнозамкнутой петлевой правоходовой обмотки с удлиненным шагом.

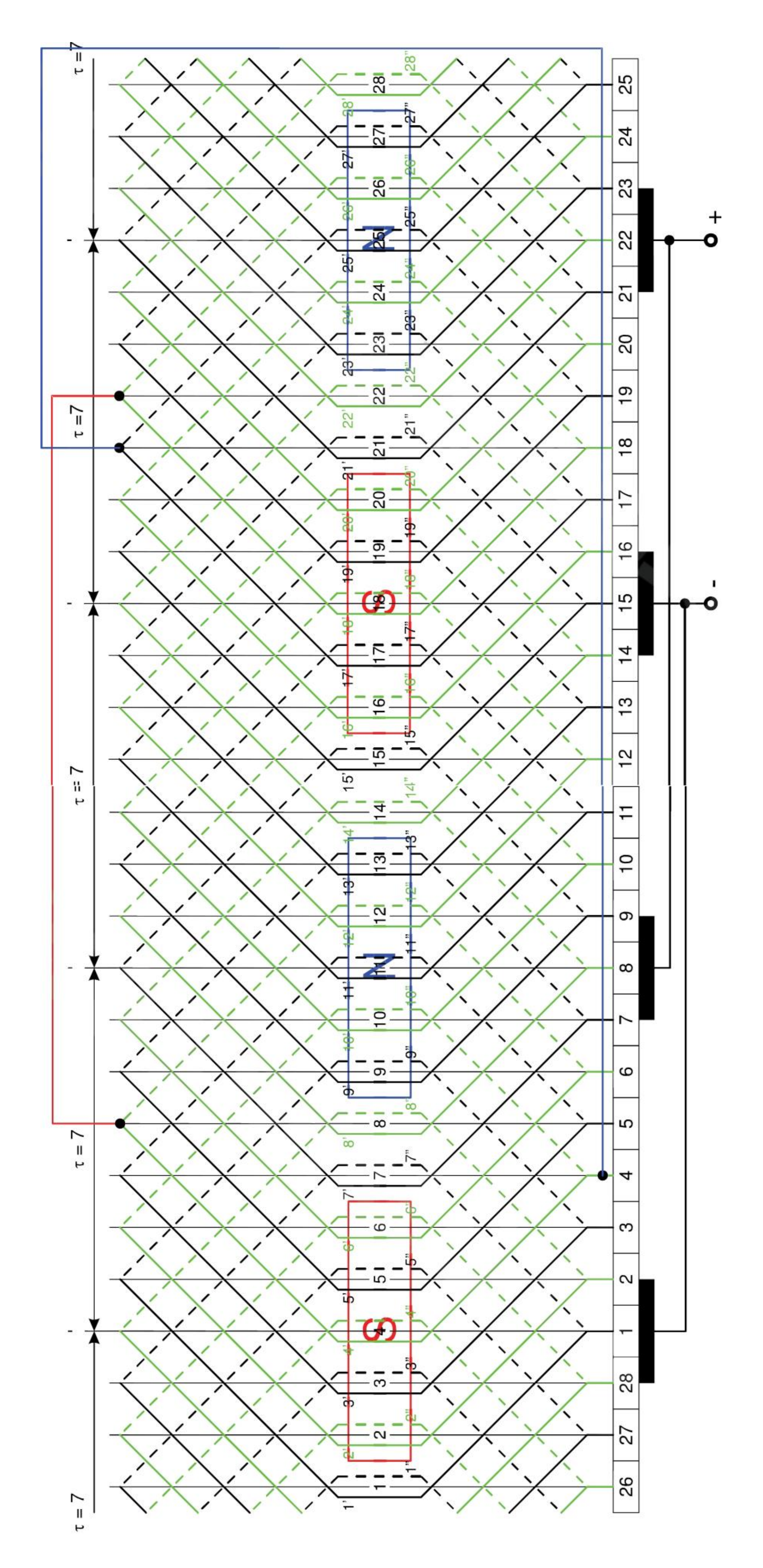


Рис. 2. 31. Двухкратнозамкнутая петлевая правоходовая обмотка с удлиненным шагом.

Литература

1. "Асинхронные двигатели серии 4А", справочник, А. Э. Кравчик и др., Москва, Энергоиздат, 1982, 504 с.
2. Костенко, М. П. "Электрические машины", в 2 ч., М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. 3–е изд., перераб. Ленинград, Энергия, 1972, ч. 1, Машины постоянного тока. Трансформаторы, учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. 544 с.
3. Костенко, М. П. "Электрические машины", в 2 ч., М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. 3–е изд., перераб., Ленинград, Энергия, 1973, ч. 2, Машины переменного тока, учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений, 648 с.
4. Проектирование электрических машин, учеб. пособие для вузов по специальности "Электрические машины", под ред. И. П. Копылова, Москва, Энергия, 1980, 495 с.
5. "Справочник по электрическим машинам", в 2 т., под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова, Москва, Энергоатомиздат, 1988, т. 1, 456 с.

Содержание стр.

Учебное издание

Обмотки электрических машин
Методические указания к практическим занятиям и курсовому проекту по дисциплине "Электрические машины" для студентов специальностей 1–53 01 05 "Автоматизированные электроприводы" и 1–43 01 03 "Электроснабжение" дневной и заочной форм обучения.

Электронный аналог печатного издания.

Автор – составитель:
Захаренко Владимир Сергеевич
Тодарев Валентин Васильевич

Редактор Н. Г. Мансурова
Подписано в печать 29. 10. 07.